



HAL
open science

Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments : analyse expérimentale et propositions de modélisations

Antoine Dugué

► **To cite this version:**

Antoine Dugué. Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments : analyse expérimentale et propositions de modélisations. Autre. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2013. Français. NNT : 2013BOR15204 . tel-00958676

HAL Id: tel-00958676

<https://theses.hal.science/tel-00958676>

Submitted on 13 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE



L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES DE L'INGENIEUR

Par **Antoine DUGUÉ**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : MÉCANIQUE

Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments : analyse expérimentale et propositions de modélisations

Directeur de thèse : **Denis BRUNEAU**

Soutenue en public le 18 octobre 2013

Devant la commission d'examen formée de :

M. JOMAA, Wahbi	Professeur des Universités, Université Bordeaux 1	Président du jury
Mme. THELLIER, Françoise	Professeur des Universités, Université Toulouse 3	Rapporteur
M. PEUPORTIER, Bruno	Directeur de recherche, Mines ParisTech	Rapporteur
M. BRUNEAU, Denis	Maître de Conférences, HDR, Arts et Métiers ParisTech	Examineur
M. LAGIÈRE, Philippe	Maître de Conférences, Université Bordeaux 1	Examineur
M. VEGA, Sergio	Full Professor, Universidad Politécnica de Madrid	Examineur
M. AROTCHAREN, Patrick	Architecte	Membre invité
M. COLOMBANI Michel	Président du groupe COVERIS	Membre invité

Laboratoires et instituts où la thèse a été préparée

Le laboratoire d'accueil de la thèse a été l'I2M, Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M) au sein des départements TREFLE (Fluides et Transferts) et IMC (Ingénierie Mécanique et Conception).



I2M

(UMR CNRS 52 95)

Site ENSCBP 16 Avenue Pey Berland

33607 Pessac cedex (F)

<http://i2m.u-bordeaux.fr/>

La thèse a reçu un financement CIFRE de la part de l'ANRT et elle a été réalisée avec Nobatek / INEF4.

NOBATEK est un centre de ressources technologiques qui développe ses activités de recherche appliquée et ses prestations de service dans les domaines de l'aménagement et de la construction durables.

INEF4 est un Institut pour la Transition Energétique qui a une activité collaborative mutualisée de recherche appliquée et d'innovation pour le secteur de la réhabilitation et la construction durables. Nobatek en est l'opérateur.



CRT Nobatek

67 rue de Mirambeau

64100 anglet

<http://www.nobatek.com/>

<http://www.inef4.com/>

Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments : analyse expérimentale et propositions de modélisations

Résumé

Lors d'une démarche de modélisation énergétique d'un bâtiment, la prise en compte de l'enveloppe solaire reste souvent imprécise. L'objet du travail présenté ici est la description détaillée de solutions de protections solaires, induisant un tirage thermique (bardage, store), dans un objectif de modélisation et de valorisation pour répondre aux besoins d'industriels du secteur ; la caractérisation des performances permet alors d'assister la maîtrise d'œuvre en phase conception.

La mise en place d'une plateforme expérimentale – mur exposé sud muni d'une protection solaire devant lame d'air – a permis la mesure de températures d'airs et d'éléments solides présents dans le système, de vitesses d'écoulement dans la lame d'air ouverte, et du flux radiatif incident. Deux types de bardage bois, un type de store et un type de métal déployé ont été considérés.

Parallèlement, un modèle 1D amélioré de transfert de chaleur dans le système étudié est développé. Trois familles de modèle de convection dans la lame d'air sont identifiées, présentées et intégrées dans le modèle global. La description de l'écoulement dans la lame d'air est retenue à partir d'analyses des résultats expérimentaux.

Un modèle simplifié d'intégration de tels systèmes de protections solaires dans des plateformes de simulation thermique de bâtiments est proposé, basé sur la paramétrisation des sollicitations extérieures par le facteur solaire. La méthode de calcul du facteur solaire est présentée. Le caractère intrinsèque facteur solaire et son intérêt sont discutés notamment à partir d'analyse de sensibilités.

Mots clés : protections solaires, façades, lame d'air ventilée, expérimentation, modélisation

Characterization and enhancement of shading solar devices in order in the context of solar building design: experimental analysis and modelling proposals

Abstract

During the design process of a building, the energetic modelling of the solar envelop is often imprecise. The purpose of the present work is the detailed description of solar shading devices that induce a chimney effect (cladding, blind), which would allow their promotion in order to meet the industrial needs of the sector.

An experimental platform – south facing wall with a shading solar device that define an air gap – has been set up and allow the measurement of temperatures, air flows in the ventilated air gap, and the incident solar radiation. Two different wooden claddings, one type of blinds and one type of expanded metal were considered.

A 1D model has been developed by considering precisely the heat transfers in the system. Three families of convection model are identified, presented and integrated in the overall model. The description of the airflow in the air gap is chosen from analysis of the experimental results.

A simplified model that allows the integration of such solar shading devices in a building simulation platform has been developed; it is based on the parameterization of external solicitations as function of the shading device properties. The calculation method of the solar factor is presented. The intrinsic nature of the solar factor is then discussed using sensibility analysis.

Key words: solar shading devices, façades, ventilated air gap, experimental analysis, numerical modelling

Remerciements

La thèse est un travail personnel de longue haleine, elle n'est pourtant pas un périple solitaire. Pendant ces années, de nombreuses personnes m'ont guidé, m'ont prodigué des conseils, m'ont stimulé, m'ont apporté une aide importante ou plus modeste. D'une façon ou d'une autre, toutes m'ont permis d'avancer. C'est ici l'occasion pour moi de les remercier.

A Denis Bruneau, mon directeur de thèse, qui m'a suivi pendant toute la durée de ce travail, j'adresse mes sincères remerciements. Depuis la définition du sujet jusqu'à sa soutenance, en passant par bien des détours, j'ai pu compter sur lui. J'ai apprécié sa grande expérience et ses précieux conseils. Philippe Lagièrre a lui aussi eu un rôle très important dans cette thèse qu'il a dirigée au sein de Nobatek avec attention et compétence. Je lui suis très reconnaissant.

Je souhaite remercier Françoise Thellier et Bruno Peuportier pour avoir accepté de rapporter mon travail de thèse. L'attention qu'ils y ont apportée et les critiques constructives qu'ils m'ont adressées ont permis de l'améliorer.

Je remercie Wahbi Jomaa d'avoir présidé le jury de thèse ainsi que Sergio Vega. Chacun dans leur domaine, ils ont enrichi la réflexion à travers remarques et questions. Je suis reconnaissant à Patrick Arotcharen et Michel Colombani d'avoir accepté l'invitation de participer au jury, et d'avoir apporté leur point de vue de praticiens reconnus dans leur domaine à ce travail plus théorique.

Je tiens à remercier Jac Tortos et Philippe Lagièrre pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette thèse dans l'environnement dynamique et motivant de Nobatek. J'ai pu évoluer dans un contexte stimulant dont les exigences m'ont permis d'acquérir des compétences de terrain complémentaires à celles acquises au cours du travail de thèse. J'ai pu ainsi travailler, au sein d'une équipe motivée et efficace sur des dossiers variés au cœur des problématiques de l'éco-construction.

Alain Sommier est l'homme grâce à qui j'ai pu mener dans de bonnes conditions mes expériences. Il a compensé avec générosité et humour mon inexpérience dans ce domaine. Grâce à lui, j'ai maintenant plus de goût pour les manipulations et montages électriques, ce qui en dit beaucoup.

J'ai pu m'appuyer sur les travaux portant sur les bardages bois de Jean-Rodolphe Puiggali, de cela et des discussions que nous avons pu avoir sur ce thème je lui suis reconnaissant.

Si l'écriture de cette thèse a été laborieuse, la relecture a dû l'être encore plus. Un seul m'a proposé de le faire et s'est acquitté au mieux de la tâche. Big up FX.

Aurélien, Monika, Stéphanie, Nicolas, merci de vous être intéressés à mon travail. Intérêt feint sûrement, mais noté et apprécié !

Aux autres collègues, Fabian, Jérem, Fabien, Ben, Igor, Bertrand, Hélène, Maddi, Lucie, Sébastien, David, Isabelle, Marie, Fréd, Jérôme, Bruno, Jean et tous les autres, en dépit de votre indifférence au mieux, de vos moqueries au pire, merci pour les bons moments passés et à venir.

Enfin, je pense aussi à ma famille :

- A la mémoire de mes grands-pères, Georges et Serge qui m'ont toujours encouragé
- A mes grands-mères, Paulette et Simone, qui m'entourent depuis toujours de leur affection et de leur confiance, je leur dis merci pour tout
- A mes parents, le cadre de travail idéal que vous m'avez offert a joué pour beaucoup dans cette réussite académique, c'est grâce à vous que j'en suis là aujourd'hui, merci
- A mon frère Olivier : first !
- A mon petit frère Adrien : merci d'avoir participé à ma procrastination

- A tous les autres membres de la famille, bien présents autour de moi en dépit des distances géographiques, merci.

Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	v
Table des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xiii
Nomenclature.....	xv
Introduction.....	1
L'architecture bioclimatique	1
La façade, élément multifonction	1
Les protections solaires verticales.....	2
Contexte et objectif de l'étude	3
Chapitre 1 : Etat de l'art.....	5
1.1 Typologie de systèmes solaires passifs de façade.....	5
1.2 Les différents systèmes solaires passifs de façade.....	6
1.2.1 Le mur Trombe-Michel, solution solaire de chauffage passif	6
1.2.2 Le SolarWall.....	7
1.2.3 Les cheminées solaires, solution de rafraîchissement passive par ventilation naturelle	8
1.2.4 Les bardages	9
1.2.5 Les façades double peaux, pour chauffage solaire passif et ventilation.....	10
1.2.6 Les plantes grimpantes comme protections solaires.....	12
1.2.7 Analyse	13
1.3 La modélisation des transferts de chaleur dans une cavité ventilée naturellement	14
1.3.1 Les échanges radiatifs	14
1.3.2 Les échanges convectifs	16
1.3.3 Conclusion sur les modèles	20
1.4 Conclusion	21
Chapitre 2 : Protocole expérimental et exploitation des mesures	23
2.1 Présentation du dispositif expérimental EPLM	24
2.1.1 Composition du dispositif expérimental EPLM	24
2.1.2 Montage du complexe EPLM.....	25
2.1.3 Les solutions de protection solaire étudiées.....	27
2.2 Présentation de l'instrumentation réalisée.....	29
2.2.1 Les paramètres à mesurer.....	29
2.2.2 Emplacement des capteurs	30
2.2.3 Les capteurs et matériel d'acquisition utilisés	31

2.3	Protocole expérimental.....	34
2.3.1	Chronologie des mesures.....	34
2.3.2	Sélection et traitement des données mesurées.....	34
2.4	Présentation des mesures.....	35
2.4.1	Eclairement mesuré.....	35
2.4.2	Vitesses d'écoulement dans les lames d'air.....	36
2.4.3	Températures d'air dans les lames d'air.....	36
	Synthèse du protocole expérimental.....	37
2.5	Comparatif entre deux solutions de bardage bois.....	38
2.5.1	Méthodologie de comparaison.....	38
2.5.2	Lame d'air de 33 mm.....	38
2.5.3	Lame d'air de 66 mm.....	42
2.6	Analyse des mesures pour le store et le métal déployé.....	45
2.6.1	Le métal déployé.....	45
2.6.2	Le store.....	47
2.7	Analyse de la vitesse d'écoulement.....	49
2.7.1	Présentation d'une séquence de mesures pour le bardage brut-clair.....	49
2.7.2	Lien entre vitesse de vent extérieur et vitesse dans la lame d'air.....	51
2.7.3	Vitesse au centre de la lame d'air et vitesse de renouvellement d'air.....	52
2.8	Analyse qualitative de l'écoulement.....	53
2.8.1	Mise en place de l'écoulement.....	53
2.8.2	Régime d'écoulement et nombre de Reynolds.....	54
2.8.3	Etude de la corrélation entre nombre de Rayleigh et vitesse mesurée.....	55
2.8.4	Écoulement nocturne.....	57
2.9	Conclusion.....	58
2.9.1	Sur l'analyse données mesurées.....	58
2.9.2	Sur l'écoulement.....	59
	Chapitre 3 : Modélisation des transferts de chaleur dans l'EPLM.....	61
3.1	Méthodologie de modélisation de l'EPLM.....	61
3.1.1	Choix du modèle, présentation générale.....	61
3.1.2	Présentations des choix de modélisation.....	63
3.1.3	Écriture générale des bilans.....	71
3.1.4	Résolution.....	72
3.2	Présentation des modèles de détermination de la vitesse d'écoulement dans la lame d'air	74
3.2.1	Approche CFD de Gan.....	74
3.2.2	Approches analytiques.....	76
3.3	Post-traitement.....	82
3.3.1	Profil de températures aux trois hauteurs.....	82
3.3.2	Calcul du facteur de transmission solaire.....	83
3.3.3	Efficacité de la protection solaire.....	86
3.4	Conclusion.....	86

Chapitre 4 : Qualification expérimentale du modèle.....	87
4.1 Introduction.....	87
4.2 Description factuelle du code de calcul mis en place.....	88
4.2.1 Programmation	88
4.2.2 Constitution du fichier météorologique.....	88
4.2.3 Propriétés des matériaux et géométries.....	88
4.2.4 Choix des caractéristiques de la modélisation	89
4.3 Comparaison entre simulations et résultats expérimentaux.....	90
4.3.1 Choix des grandeurs physiques représentées.....	90
4.3.2 Cas d'une lame d'air de 33 mm pour les deux bardages bois.....	90
4.3.3 Autres cas : bardage, store et métal déployé	102
4.4 Conclusions.....	109
Chapitre 5 : Exploitation du modèle	111
5.1 Introduction.....	111
5.2 Analyse de la méthode réglementaire de modélisation d'un bardage.....	111
5.2.1 Présentation de la méthode réglementaire de modélisation d'un mur muni d'un bardage	111
5.2.2 Analyse	115
5.3 Calcul du facteur solaire total avec le modèle PdC+	115
5.3.1 Objectif et méthode	115
5.3.2 Réalisation des calculs.....	116
5.3.3 Application au cas des bardages bois.....	117
5.3.4 Conclusions.....	120
5.4 Discussion sur le caractère intrinsèque du facteur solaire	121
5.4.1 Sensibilité aux paramètres de calcul du facteur solaire.....	121
5.4.2 Sensibilité aux paramètres associés à la configuration du système étudié	123
5.5 Discussion sur la pertinence du facteur solaire.....	124
5.6 Conclusion	125
5.6.1 Sur la méthode de calcul facteur solaire	125
5.6.2 Sur le caractère intrinsèque du facteur solaire	125
5.6.3 Sur les exploitations des modèles ici présentés.....	126
Conclusion générale et perspectives.....	127
Bibliographie	131
Annexes	135

1. Schéma de modélisation des transferts de chaleur dans EPLM	135
2. Tableaux de corrélations issues du travail de Gan (2011).....	136
3. Données constructeurs des protections solaires	136

Table des figures

Figure 1.1 : Illustration des quatre configurations étudiées pour la convection naturelle entre deux plans chauffés, In-In, In-Out, Out-Out.....	6
Figure 1.2 : Mur Trombe du parc national Zion, Utah Etats Unis, étudié par Torcellini et Pless (2004).....	6
Figure 1.3 : Illustration du SolarWall (source: www.solarwall.com).....	8
Figure 1.4 : Cheminée solaire du lycée français de Damas, en Syrie par Yves Lion.....	8
Figure 1.5 : Exemple des maisons du quartier Arroussets à Bayonne qui intègrent un bardage pin maritime ventilé devant une isolation par l'extérieur.....	9
Figure 1.6 : Illustration d'une façade double peau : le bâtiment de l'Office 64 à Bayonne. Architecte P. Arotcharen.....	11
Figure 1.7 : Bâtiment Consorcio à Santiago au Chili avec une façade végétalisée, de l'architecte Enrique Brown. Vue extérieure et intérieure pour les saisons été et hiver.....	12
Figure 1.8 : Schéma du phénomène de multi-réflexion du rayonnement CLO.....	15
Figure 1.9 : Illustration du profil d'écoulement vertical et de la vitesse moyenne dans une cavité chauffée.....	17
Figure 2.1 : Schéma représentant les éléments composant le complexe EPLM.....	24
Figure 2.2 : Schéma indiquant les cotes en mm et reportant les couches composant le complexe EPLM.....	25
Figure 2.3 : Premier panneau de BA13 posé, thermocouples placés.....	26
Figure 2.4 : Linteaux fixés, mise en place du bardage pin brut-clair.....	26
Figure 2.5 : Les deux bardages (pin brut-clair et pin aggro-rouge) sont placés.....	26
Figure 2.6 : Le métal déployé à côté du bardage pin brut-clair.....	26
Figure 2.7 : illustration des caractéristiques géométriques du métal déployé (d'après documentation commerciale MétalDéployé).....	27
Figure 2.8 : Bardage aggro-rouge (haut), bardage brut-clair (milieu) et store (bas) avec scotch.....	28
Figure 2.9 : Caméra IR sur trépied.....	28
Figure 2.10 : exemple de mesure infrarouge pour les deux types de bardage.....	28
Figure 2.11 : résultats des mesures effectuées d'émissivité de trois protections solaires en fonction de la température d'ambiance du four et valeur moyenne retenue.....	29
Figure 2.12 : Schéma de l'emplacement des capteurs dans l'EPLM. X Thermocouples K, O anémomètres à fil chaud, □ pyranomètre, △ anémomètre à coupelles.....	30
Figure 2.13 : Pyranomètre installé sur le complexe.....	31
Figure 2.14 : Anémomètre à coupelle placé au-dessus du complexe EPLM.....	32
Figure 2.15 : Anémomètre à fil chaud et les emplacements aux hauteurs moyenne et haute derrière le métal déployé pour une lame d'air de 99mm.....	32
Figure 2.16 : Deux thermocouples placés. Un sur la plaque de BA13 et l'autre dans la lame d'air.....	33
Figure 2.17 : Les deux générateurs basse tension utilisés.....	33
Figure 2.18 : Centrale d'acquisition, composée de deux cartes pour thermocouples et une pour tension.....	34
Figure 2.19 : Flux radiatif en grande longueur d'onde incident la journée du 01/09/2012.....	35
Figure 2.20 : Vitesses mesurées dans les lames d'air la journée du 01/09/2012. En bleu, la vitesse à hauteur z_b , en rouge, à hauteur z_m , pour le cas du bardage brut-clair. En vert, à la hauteur z_n pour le bardage aggloméré-rouge.....	36
Figure 2.21 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage brut-clair, journée du 01/09/2012, séquence n°1.....	37
Figure 2.22 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage aggro-rouge, journée du 01/09/2012, séquence n°1.....	37
Figure 2.23 : Densité de flux solaire incident, séquence n°2.....	38
Figure 2.24 : Vitesse de vent extérieur pour la séquence n°2. Les points, les mesures à chaque pas de temps, en trait plein, la moyenne mobile de ces mesures.....	38
Figure 2.25 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2.....	39
Figure 2.26 : Vitesse d'écoulement mesurée, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2.....	39
Figure 2.27 : Températures à l'interface entre le mur et la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2.....	39

Figure 2.28 : Températures à l'interface entre la protection solaire et la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2	39
Figure 2.29 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage brut-clair, séquence n°2.....	40
Figure 2.30 : Vitesse d'écoulement mesurée, cas du bardage brut-clair, séquence n°2	40
Figure 2.31 : Températures à l'interface entre le mur et la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage brut-clair, séquence n°2	40
Figure 2.32 : Températures à l'interface entre la protection solaire et la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage brut-clair, séquence n°2.....	40
Figure 2.33 : Evolution du gradient thermique horizontal (°C) dans la 2ème couche de plâtre de l'ELPM pendant la séquence n°2. Trait plein, cas du bardage aggro-rouge, en tiret, cas du bardage brut-clair.....	41
Figure 2.34 : Densité de flux solaire incident pour la séquence n°4	42
Figure 2.35 : Vitesse de vent extérieur pour la séquence n°4. Les points, les mesures à chaque pas de temps, en trait plein, la moyenne mobile de ces mesures.	42
Figure 2.36 : Vitesses mesurées dans la lame d'air derrière les bardages pin brut (tirets), et pin aggloméré (trait plein) pour la séquence n°4	43
Figure 2.37 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage brut-clair, séquence n°4.....	43
Figure 2.38 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°4.....	43
Figure 2.39 : Evolution de du gradient thermique horizontal (°C) dans la 2 ^{ème} couche de plâtre de l'ELPM pendant la séquence n°4. Trait plein, cas du bardage aggro-rouge, en tiret, cas du bardage brut-clair.	44
Figure 2.40 : Densité de flux solaire incident pour la séquence n°9	45
Figure 2.41 : Vitesse de vent extérieur pour la séquence n°9. Les points, les mesures à chaque pas de temps, en trait plein, la moyenne mobile de ces mesures.	45
Figure 2.42 : Températures aux trois hauteurs dans la lame d'air, cas du métal déployé, séquence n°9	46
Figure 2.43 : Vitesse d'écoulement de l'air pendant la séquence n°9. En trait plein, cas du métal déployé, en tirets, cas du bardage brut-clair comme référence	46
Figure 2.44 : Evolution du gradient thermique horizontal (°C) dans la 2ème couche de plâtre pour la séquence n°9. En trait plein, le cas du métal déployé, en tirets, le bardage brut-clair.....	47
Figure 2.45 : Densité de flux solaire incident pour la séquence n°7	47
Figure 2.46 : Vitesse de vent extérieur pour la séquence n°7. Les points, les mesures à chaque pas de temps, en trait plein, la moyenne mobile de ces mesures.	47
Figure 2.47 : Températures aux trois hauteurs dans la lame d'air, cas du store, séquence n°7.....	48
Figure 2.48 : Vitesses d'écoulement mesurées, cas du store, séquence n°7.....	48
Figure 2.49 : Evolution du gradient thermique horizontal (°C) dans la 2 ^{ème} couche de plâtre pour le cas store et bardage pin brut pour la séquence n°7.....	48
Figure 2.50 : Eclairement mesuré (W/m ²) pendant la séquence n°1.....	49
Figure 2.51 : Vitesse de vent extérieure mesurée (m/s) pendant la séquence n°1. Les points, les mesures ponctuelles, et le trait plein, la moyenne mobile	49
Figure 2.52 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air (z_b en bleu, z_m en rouge, et z_h en vert), et à l'extérieur (pointillés noirs) pendant la séquence n°1.	50
Figure 2.53 : Vitesses d'air mesurées dans la lame d'air (z_b en bleu, z_m en rouge, et z_h en vert)	50
Figure 2.54 : Vitesses d'air mesurées dans la lame d'air et à l'extérieur, journée du 31/07, séquence n°1. Pointillés bleus, à hauteur basse de la lame d'air. En ligne continue rouge, à la hauteur médiane de la lame d'air. Tirets noirs : vitesse de vent extérieur.....	51
Figure 2.55 : Nombres de Reynolds calculés pour la séquence 2. Ligne continue, pour le bardage brut-clair, pointillés, pin aggloméré.....	54
Figure 2.56 : Nombre de Rayleigh (trait plein) et vitesse de renouvellement d'air mesurée (pointillés) pour la séquence n°2, cas bardage aggro-rouge	55
Figure 2.57 : Nombre de Rayleigh (trait plein) et vitesse de renouvellement d'air mesurée (pointillés) pour la séquence n°2, cas bardage brut-clair.....	55
Figure 2.58 : Nombre de Rayleigh (trait plein) et vitesse de renouvellement d'air mesurée (pointillés) pour la séquence n°4, cas bardage aggro-rouge	56
Figure 2.59 : Nombre de Rayleigh (trait plein) et vitesse de renouvellement d'air mesurée (pointillés) pour la séquence n°4, cas bardage brut-clair.....	56
Figure 2.60 : Nombre de Rayleigh (trait plein) et vitesse de renouvellement d'air mesurée (pointillés) pour la séquence n°9, cas métal déployé.....	56

Figure 2.61 : Nombre de Rayleigh (trait plein) et vitesse de renouvellement d'air mesurée (pointillés) pour la séquence n°7, cas store	56
Figure 2.62 : Vitesse maximale diurne en fonction de la vitesse moyenne nocturne pour chaque configuration. pb correspond à bardage brut-clair, pa bardage aggro-rouge, md à métal déployé.	58
Figure 3.1 : schéma d'emplacement des résistances et capacité dans une couche solide	62
Figure 3.2 : Densité de flux de chaleur radiative en GLO incident en provenance du ciel. Tirets larges : d'après Falk <i>et al.</i> (2012), tirets serrés : d'après Duffie et Beckman (1974), pointillés : d'après Monteith et Unsworth (1991), ligne continue : d'après Hénon <i>et al.</i> (2011) et alternance tiret point : température d'air extérieur mesurée	66
Figure 3.3 : Représentation des échanges au niveau de la face externe de la Protection solaire	68
Figure 3.4 : Représentation des échanges au niveau de la lame d'air	69
Figure 3.5 : Représentation des échanges au nœud intérieur de la zone intérieure	70
Figure 3.6 : Schéma des deux types de cavité considérés d'après Gan (2011). Les flux q_1 et q_2 apparaissent, et l'extérieur est à « droite »	74
Figure 3.7 : Localisation des pertes de charge de l'écoulement vertical. Δp_{fr} est associée aux frottements, $\Delta p_{bas,1}$ associée à la réduction de section à l'entrée, $\Delta p_{bas,2}$ associée au coude, Δp_{haut} associée à la sortie	77
Figure 3.8 : Nombre de Grashof en fonction de la différence de température motrice	81
Figure 3.9 : Valeurs du nombre de Nusselt selon différentes corrélations. Bleu, Churchill et Chu (1975), rouge McAdams (1994), vert, Fishenden et Saunders (1950), violet, Alamdari et Hamond (1963), bleu ciel, De Witt, utilisé par Ong (2003)	81
Figure 3.10 : Schéma illustrant les composantes du facteur de transmission solaire	83
Figure 4.1 : Vitesse d'écoulement vertical de l'air calculée par les trois approches et vitesse mesurée, cas bardage aggro-rouge, séquence n°2. En tirets bleus « Gan », en tirets-points rouges, « Ong », en ligne continue verte, « PdC », et en pointillé gris, la mesure	91
Figure 4.2 : Gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé par les trois approches et mesurée, cas bardage aggro-rouge, séquence n°2. En tirets bleus « Gan », en tirets-points rouges, « Ong », en ligne continue verte, « PdC », et en pointillé gris, la mesure	92
Figure 4.3 : Gradient thermique horizontal dans la 2 ^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, simulé selon les trois modélisations, et mesuré, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2. En tirets bleus « Gan », en tirets-points rouges, « Ong », en ligne continue verte, « PdC », et en pointillé gris, la mesure	93
Figure 4.4 : Vitesse de l'écoulement de l'air dans la lame d'air calculée avec ou sans prise en compte du vent extérieur et vitesse mesurée, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2. En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure	94
Figure 4.5 Gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur, et différence mesurée, cas bardage aggro-rouge, séquence n°2.	95
Figure 4.6 : Gradient thermique horizontal dans la 2 ^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur et gradient mesuré, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2.	95
Figure 4.7 : Vitesse d'écoulement vertical de l'air calculée par les trois approches et vitesse mesurée, cas bardage brut-clair, séquence n°2. En tirets bleus « Gan », en tirets-points rouges, « Ong », en ligne continue verte, « PdC », et en pointillé gris, la mesure	98
Figure 4.8 : Gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé pour les trois approches et mesuré, cas bardage brut-clair, séquence n°2.	98
Figure 4.9 : Gradient thermique horizontal dans la 2 ^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, simulé selon les trois modélisations, et mesuré, cas du bardage brut-clair, séquence n°2.	98
Figure 4.10 : Vitesse de l'écoulement de l'air dans la lame d'air calculée avec ou sans prise en compte du vent extérieur et comparée à la mesure, cas du bardage brut-clair, séquence n°2. En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure.	99
Figure 4.11 : Gradient vertical de température d'air de la lame d'air calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur, et gradient mesurée, cas bardage brut-clair, séquence n°2.	100
Figure 4.12 : Gradient thermique horizontal dans la 2 ^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur et gradient mesuré, cas du bardage brut-clair, séquence n°2.	100

Figure 4.13 : Vitesse de l'écoulement de l'air dans la lame d'air calculé avec ou sans pris en compte du vent extérieur et comparé à la mesure, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°4. En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure	102
Figure 4.14 : Gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur, et gradient mesurée, cas bardage aggro-rouge, séquence n°4.	103
Figure 4.15 : Gradient thermique horizontal dans la 2 ^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur et gradient mesuré, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°4.....	103
Figure 4.16 : Vitesse de l'écoulement de l'air dans la lame d'air calculé avec ou sans pris en compte du vent extérieur et comparé à la mesure, cas du store, séquence n°7. En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure	104
Figure 4.17 : Gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur, et gradient mesuré, cas du store, séquence n°7.	105
Figure 4.18 : Gradient thermique horizontal dans la 2 ^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur et gradient mesuré, cas du store, séquence n°7.	105
Figure 4.19 : Vitesse de l'écoulement de l'air dans la lame d'air calculé avec ou sans pris en compte du vent extérieur et comparé à la mesure, cas du métal déployé, séquence n°9. En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure.	106
Figure 4.20 : Gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur, et gradient mesuré, cas du métal déployé, séquence n°9.	106
Figure 4.21 : Gradient thermique horizontal dans la 2 ^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur et gradient mesuré, cas du métal déployé, séquence n°9.	106
Figure 4.22 : Illustration de l'impact de la perméabilité de la protection solaire sur l'écoulement dans la lame d'air.	107
Figure 5.1 : Extrait de la RT 2012, règles Th U fascicule 4 «parois opaques » qui précise les valeurs des « résistances thermiques de parois donnant sur l'extérieur »	112
Figure 5.2 : Extrait de la RT 2012, règles Th U fascicule 4 «parois opaques » qui précise la méthode de prise en compte des parois fortement ventilées.....	112
Figure 5.3 : Extraits de la RT 2012, règles Th S, schéma descriptif et tableau donnant les valeurs du coefficient de correction pour le cas des lames d'air verticales ventilées sur l'extérieur	114
Figure 5.4 : Evolution de la puissance de rafraichissement de la zone intérieure pour les 4 modèles sélectionnés, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2. En tirets-points verts, référence, en tirets rouge, RT, en points noirs, PdC+, en ligne violette, référence + fs.	118
Figure 5.5 : Evolution de la puissance de rafraichissement de la zone intérieure pour les 4 modèles sélectionnés, cas du bardage brut-clair, séquence n°2. En tirets-points verts, référence, en tirets rouge, RT, en points noirs, PdC+, en ligne violette, référence + fs.	120
Figure 5.6 : Les facteurs solaires des trois protections solaires (bardages brut-clair et aggro-rouge et le store) calculés pour des valeurs de thermostat entre 20 et 28 °C.	122
Figure 5.7 : Le facteur solaire du bardage aggro-rouge pour une lame d'air de 33 mm calculé selon les 9 séquences météorologiques du tableau 2.2	122
Figure 5.8 : Les valeurs du facteur solaire du bardage aggro-rouge calculé pour une épaisseur d'isolant variable, dans les configurations ITI et ITE.....	123
Figure 5.9 : Le facteur solaire du bardage aggro-rouge calculé pour une épaisseur de la couche de béton variable, dans les configurations ITI et ITE.....	124

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Propriétés thermiques des matériaux.....	29
Tableau 2.2 : Séquences de mesures choisies et leurs détails.....	35
Tableau 5.1 : Valeurs du coefficient de correction adapté des protections solaires étudiées selon l'épaisseur de lame d'air.....	115
Tableau 5.2 : Valeurs du coefficient de correction des protections solaires étudiées selon l'épaisseur de lame d'air.....	115
Tableau 5.3: Tableau donnant les facteurs solaires calculés pour les différentes protections solaires étudiées et les différentes épaisseurs de lame d'air.....	116
Tableau 5.4 : besoins de rafraîchissement cumulés sur la première journée de la séquence n°2 calculés pour les 4 modèles.....	117
Tableau 5.5 : besoins de rafraîchissement cumulés sur la première journée de la séquence n°2 calculés pour les 4 modèles.....	119
Tableau 5.6 : besoins de rafraîchissement cumulés sur la première journée de la séquence n°2 calculés pour les 4 modèles.....	120

Nomenclature

Lettres latines

A	Section de passage de l'air	m^2
C	Capacité thermique	J/K
C_p	Capacité thermique massique	J/kg.K
d	Diffusivité thermique	m/s^{-2}
e_{la}	Épaisseur de la lame d'air	m
ep	Épaisseur d'une maille	m
F	Facteur de forme pour échange radiatif entre EPLM et ciel	(-)
fs	Facteur de transmission solaire	(-)
Gr	Nombre de Grashof	(-)
H	Hauteur de la lame d'air	m
h	Coefficient de transfert thermique surfacique	$W/m^2.K$
Is	Densité de flux solaire incident	W/m^2
K	Coefficient de friction	(-)
m	Masse	kg
n	Nombre de nœuds du maillage	(-)
Nu	Nombre de Nusselt	(-)
p	Pression	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	(-)
R	Résistance thermique	$m^2.K/W$
Re	Nombre de Reynolds	(-)
S	Surface d'échange	m^2
T	température	K
v	Vitesse d'écoulement	m/s
V	Volume	m^3
z	Hauteur	m

Lettres grecques

Φ	Flux de chaleur	W/m^2
φ	Densité de flux de chaleur	W/m^2
τ	Coefficient de transmission	(-)
ρ	Coefficient de réflexion	(-)
	Masse volumique	kg/m^3
α	Absorptivité	(-)
ε	émissivité	(-)
σ	Constante de Stefan Boltzmann	$W/m^2.K^4$
λ	Conductivité thermique	$W/m.K$
μ	Viscosité dynamique	Pa.s
ξ	Coefficient de perte de charge	(-)
ϱ	Critère de convergence	(-)
Δp	Différence de pression	Pa
γ	Coefficient de pondération	(-)
η	Efficacité de la protection solaire	(-)
χ	Coefficient de correction du facteur de paroi opaque avec lame d'air extérieure ventilée (méthode RT)	

Indices

	Relatif à
air	Air
ciel	Ciel
CLO	Correspondant aux courtes longueurs d'onde
cv	Relatif à aux échanges par convection
cool	Relatif à la charge de rafraichissement
ext	Extérieur
GLO	Correspondant aux grandes longueurs d'onde
i	Face intérieure de la couche considérée
int	Intérieur
L	Lame d'air (nœud)
la	Lame d'air
o	Face extérieure de la couche considérée
rad	Relatif aux échanges radiatifs
P	Protection solaire (nœud)
M	Mur (nœud)
O	Les propriétés de l'air à la température ambiante, ici 20°C
b	En partie basse (entrée de lame d'air)
m	Au milieu
h	En partie haute (sortie de lame d'air)
Les indices pour les pertes de charge et pression motrice	
pm	Pression motrice
Coude	Conduite coudée
Réduction	Réduction de section
Agrandissement	Augmentation de section

Opérateurs

\rightarrow	Vecteur
\cdot	Dérivée par rapport au temps
—	Moyenne spatiale
$\ \quad \ $	Norme

Abréviations

INT	Intérieur
EXT	Extérieur
CLO	Courte Longueur d'Onde
GLO	Grande Longueur d'Onde
EPLM	Nom du système étudié :
	Extérieur - Protection solaire - Lame d'air -- Mur
ENV	Relatif à l'environnement extérieur

Introduction

L'architecture bioclimatique

Un bâtiment définit un espace dont l'ambiance doit être maîtrisée, de telle manière à être confortable pour l'utilisateur. Ce confort intègre les aspects thermiques, acoustiques, lumineux... Afin de maîtriser l'ambiance thermique, il est nécessaire de gérer les différents échanges de chaleur pour lesquels l'environnement extérieur représente une sollicitation par les variations de températures, d'apports solaires, de vitesse et orientation de vent.

L'objectif de l'architecture bioclimatique est d'assurer le maintien d'une ambiance confortable par des solutions qui impactent le moins l'environnement. Le rapport du bâtiment avec l'ambiance extérieure est alors complexe, ce dernier pouvant avoir un impact positif ou négatif. En hiver, en l'absence de soleil, il s'agit de limiter les pertes, ce qui se fait notamment par l'isolation de l'enveloppe. Le bâtiment doit aussi pouvoir bénéficier des apports solaires, quand ils sont possibles. En été, afin de limiter les surchauffes, l'objectif est de limiter les apports, et d'évacuer la chaleur interne.

L'isolation thermique de l'enveloppe est un point essentiel de la conception de bâtiments performants. Les travaux de recherche sur la thermique du bâtiment engagés après le choc pétrolier de 1973 et l'accroissement du coût de l'énergie, révèlent l'importance de l'isolation thermique des bâtiments dans la maîtrise de la consommation d'énergie. Cette isolation permet de limiter les pertes par l'enveloppe l'hiver, et de limiter les apports l'été. Il est montré que l'isolation est plus performante si elle est placée en périphérie extérieure du bâtiment plutôt qu'à l'intérieur. Différents avantages sont associés à l'isolation thermique par l'extérieur (ITE). La limitation des ponts thermiques permet une meilleure isolation de l'enveloppe, et ainsi la réduction des pertes. L'inertie thermique intérieure du bâtiment est alors plus élevée limitant les variations de températures, et assurant notamment un meilleur confort d'été. Dans le cas de rénovation, elle permet de ne pas modifier la surface habitable et de limiter l'impact des travaux sur l'activité du bâtiment. Enfin, quand l'isolation est placée du côté extérieure, elle augmente la durabilité de l'enveloppe, les variations de températures étant plus faibles, les défauts liés à l'humidité et au gel plus rares.

La façade, élément multifonction

La façade est un point clé dans l'architecture contemporaine. Elle est à la fois le principal moyen de manifester l'esthétique du projet et d'autre part, composante essentielle de l'efficacité énergétique du bâti. La façade porte ainsi l'image d'un projet, permet les apports de chaleur, de bénéficier de la lumière naturelle, de produire de l'électricité avec les panneaux solaires mais doit aussi assurer la maîtrise des apports de chaleur avec les protections solaires et les solutions de rafraîchissement par ventilation naturelle. Ces façades sont ainsi des systèmes complexes multifonctions en plein essor et les performances des bâtiments reposent très fortement sur la qualité de la conception et de la réalisation de leurs façades.

On remarquera que dans la modélisation énergétique d'un bâtiment, la prise en compte de l'enveloppe solaire reste relativement faible, comme le précisent Kunh *et al.* (2011). Le caractère limité de la modélisation d'un bardage par la modification de la résistance thermique extérieure, est un exemple. Les systèmes de chauffage solaire passif sont rarement pris en compte. Et les solutions de protection solaire sont de plus en plus variées et présentes aussi bien sur le marché de la construction neuve que celui de la rénovation de bâtiment.

Ainsi, on considère l'enveloppe de protection solaire qui englobe l'enveloppe structurelle ; elle inclut alors un bardage ventilé, des protections solaires textiles plus ou moins distantes mais aussi des écrans végétaux devant des surfaces vitrées. Elles ont toutes en commun le fait de modifier les sollicitations extérieures à la limite de l'enveloppe structurelle, en modifiant notamment les transferts de chaleur radiatifs et convectifs.

Quant à l'aspect thermique, la relation aux apports solaires évolue au cours de l'année : la façade doit permettre de capter de la chaleur solaire l'hiver tout en limitant les apports l'été. Au niveau de la façade, les protections solaires, les systèmes qui captent l'énergie, mais aussi à une échelle plus grande les espaces tampons comme les vérandas ou les façades double peaux, sont des solutions qui reposent sur la gestion des échanges de chaleur.

Nous nous intéressons dans la suite plus particulièrement aux protections solaires verticales.

Les protections solaires verticales

Le bardage, solution pertinente en protection d'une ITE

Dans le cas d'une isolation par l'extérieur, pour assurer la durabilité de l'isolant, il est nécessaire de le protéger de l'environnement extérieur et tout particulièrement de sources d'humidité. En effet, cette humidité dégrade les performances de l'isolant en augmentant notamment sa conductivité thermique et en diminuant sa durabilité. La pose d'un bardage ventilé devant l'isolant est une solution adaptée. Ce bardage a pour fonction première de protéger l'isolant de l'humidité. Il limite les apports directs d'humidité par la pluie. Et la lame d'air située entre le bardage et le mur extérieur, ventilée naturellement, doit assurer un séchage suffisant pour éviter la diffusion d'eau dans l'isolant.

Quand exposé au soleil, la chaleur absorbée par le bardage est en partie transmise à la lame d'air. L'air ainsi chauffé se dilate, abaissant la pression locale. Cette baisse de pression entraîne un gradient moteur d'écoulement ascendant qui se traduit un renouvellement d'air : l'air extérieur passe par l'entrée basse du bardage, s'écoule verticalement en échangeant par convection avec les parois chaudes, et ressort par la sortie haute. Le phénomène est entretenu par le flux de chaleur donné à l'air par la protection solaire chauffée par le soleil. C'est le phénomène de cheminée thermique, tirage thermique ou thermosiphon.

Les protections solaires semi transparentes

L'amélioration des propriétés des vitrages a induit une nette augmentation des bâtiments fortement vitrés. La conception et la construction de ces bâtiments alors soumis à de forts apports solaires en mi saison et été, est en nette progression. Pour de tels bâtiments, de grande hauteur, seule l'utilisation d'une protection solaire verticale permet d'envisager une réduction efficace des besoins de refroidissement estivaux. Les protections solaires utilisées se doivent de plus d'être amovibles, mobiles, modulables et/ou dynamiques de façon à permettre et favoriser les apports hivernaux. Les

protections solaires semi perméables telles que les toiles textiles et les écrans végétaux extérieurs sont des solutions pertinentes.

Pour ces protections solaires, il faut remarquer que là aussi l'écoulement entre le store et la paroi peut avoir lieu. Des grilles métalliques comme le métal déployé sont parfois positionnées devant des parois opaques avec comme premier objectif l'habillage du bâtiment, mais aussi d'assurer une protection de l'enveloppe, par la limitation des apports solaires et de l'humidité apportée par les intempéries pluvieuses.

Intérêt de l'étude de l'écoulement induit derrière les protections solaires

L'écoulement qui prend place entre la protection solaire et la paroi peut être un élément crucial de leurs performances. En effet, pour un bardage, la capacité à sécher l'isolant est déterminée en partie par ce renouvellement d'air. De plus, le rôle secondaire de limitation d'apport de chaleur dans le bâtiment l'été est là aussi dépendant de ce mouvement de convection naturelle dans un milieu ouvert. Les règles de mise en œuvre classiques préconisent des lames d'air de 25 à 40mm d'épaisseur, mais sont relativement indifférentes quant aux types de matériaux qui constituent le bardage. Il existe une certaine attente des industriels en vue de la valorisation de ces solutions, et elle passe par une meilleure caractérisation de leurs performances.

Contexte et objectif de l'étude

Contexte de l'étude

L'habillage des bâtiments se complexifie notamment par la volonté des architectes de renforcer l'image d'un bâtiment, mais aussi pour des raisons énergétiques. Le bardage ventilé est une solution adaptée pour éviter la dégradation des performances d'une isolation par l'extérieur par l'humidité. Les stores perforés permettent une meilleure maîtrise des apports solaires. Ainsi, l'utilisation des protections solaires verticales comme les bardages, les stores, métal déployé se développent.

Pourtant, la valorisation de ces solutions par la réglementation thermique française ou par des certifications comme HQE reste limitée. La faible prise en compte de ces solutions dans les plateformes de simulation thermique dynamique des bâtiments ne permet pas non plus la valorisation de ces solutions par des études de simulation thermique dynamique du comportement des bâtiments.

Plus en relation avec le marché, les industriels qui fabriquent ces systèmes, ou les architectes et bureau d'étude qui préconisent ces solutions, sont en attente d'une caractérisation de la performance ces solutions en vue de leur valorisation.

La description de l'impact de ces solutions sur le comportement énergétique du bâtiment passe par une meilleure compréhension de l'écoulement dans la lame d'air entre la protection solaire et la paroi. La recherche associée à ces solutions porte notamment sur le thème de l'écoulement dans une cavité ouverte entre deux plaques verticales chauffées asymétriquement. Elle s'est développée pour des cas appliqués au bâtiment, avec l'étude des murs trombe, des cheminées solaires, des façades double peaux, des bardages.

Problématique et démarche générale

Une des volontés de ce travail est d'étudier la correspondance entre des prédictions de modèles existants dans la littérature, et des mesures réalisées sur différentes solutions en extérieur. Ceci nécessite la mise en place d'un protocole expérimental, ainsi que le développement un modèle des échanges de chaleur prenant place à l'échelle de la paroi, et intégrant les modélisations existantes citées ci-dessus.

A partir de ces comparaisons, l'objectif est d'implémenter ces éléments de modélisation dans un modèle simplifié et plus général de transferts à l'échelle d'une paroi.

Enfin, la finalité est d'utiliser le modèle établi pour mieux analyser l'impact de ces protections sur le comportement du bâtiment associé. Pour cela, l'approche est de modéliser la présence de ces protections solaires comme une modification des paramètres relatifs aux sollicitations extérieures. Ainsi, ce modèle doit aboutir à une proposition de modélisation simple pour l'intégration de la prise en compte de ces solutions dans une plateforme de simulation thermique dynamique de bâtiments sans avoir à modifier les modèles de parois.

Dans le premier chapitre, les études présentes dans la littérature sont analysées selon le type de systèmes solaires passifs de façade considérés. Puis les différentes modélisations des principaux types de transferts dans la lame d'air sont présentées. Ce travail d'état de l'art permet d'identifier les points critiques de la modélisation des transferts de chaleur à l'échelle d'une protection solaire et de la paroi associée.

Ensuite, une installation expérimentale a été mise en place en extérieur. Une protection solaire a été placée devant un mur opaque, délimitant une lame d'air ouverte entre ces deux éléments. L'objectif est la mesure d'un certain nombre de données pour étudier le comportement du système étudié et en particulier l'écoulement dans la lame d'air. La géométrie de l'installation, les matériaux utilisés, les données mesurées sont présentés dans la première partie du chapitre 2. Les mesures réalisées pour différents types de protections solaires (bardages bois, stores et métal déployé) sont présentés et discutés dans la seconde partie de celui-ci.

Un modèle de transfert de chaleur dans le système est présenté dans le chapitre 3. Les choix de modélisation sont précisés, et une discussion de trois types de modélisation de l'écoulement vertical d'air dans la cavité est faite.

Dans le quatrième chapitre, le modèle développé dans ce travail est qualifié par comparaison avec les mesures réalisées pour les différentes protections solaires et différentes épaisseurs de lame d'air. Les points limitant sont discutés et un modèle de description fine est retenu.

Dans le dernier chapitre, une méthode de prise en compte des éléments de protections solaires par une plateforme de simulation thermique dynamique de bâtiment est présentée. Elle se base sur l'utilisation du facteur solaire de ces éléments de protection solaires, celui-ci étant calculé à l'aide du modèle développé dans cette étude. Enfin, les propriétés de ce facteur solaire sont discutées, notamment à travers une analyse de sensibilité.

Chapitre 1 :

Etat de l'art

1.1 Typologie de systèmes solaires passifs de façade

Les systèmes solaires passifs de façade correspondent à des systèmes ou dispositions constructives situés en façades de bâtiment, dont le fonctionnement s'appuie sur l'énergie solaire et dont l'objectif est d'assurer un rôle de chauffage, rafraîchissement ou ventilation (au sens de renouvellement d'air) pour le bâtiment. Le terme passif indique que le fonctionnement ne repose pas sur une autre source d'énergie.

Le fonctionnement de la plupart de ces systèmes s'appuie sur un mouvement de convection naturelle de l'air, ce qui se traduit par un transport d'énergie. Dans cette étude, nous nous intéresserons à ces systèmes. Ils appartiennent à l'enveloppe thermique du bâtiment, et sont constitués d'un élément vertical que nous appellerons parement, placé devant l'enveloppe structurelle du bâtiment (mur ou vitrage).

Les systèmes passifs de façade mettant en jeu un phénomène de convection naturelle peuvent être regroupés en quatre catégories. L'écoulement de l'air se fait entre deux ouvertures : une en partie basse, et l'autre en partie haute. Les ouvertures basses et hautes peuvent alors se faire vers l'intérieur (c'est-à-dire vers le bâtiment) ou l'extérieur définissant ainsi 4 cas.

Afin d'associer les systèmes solaires passifs de façade à ces catégories, nous les nommons sous les formes *In-In*, *In-Out*, *Out-In*, et *Out-Out* représentés sur la figure 1.1. *In* correspond à une connexion avec le bâtiment, et *Out* avec l'extérieur. Le premier terme correspond à l'ouverture basse, et le second à l'ouverture haute. Nous présentons ici ces configurations de manière simple dans le cas d'un apport solaire dans la lame d'air.

- *In – In* : l'air chauffé dans la lame d'air, entraîne un mouvement de convection, depuis le bas vers le haut. L'air neuf qui provient du bâtiment, entre en partie basse de la cavité, il est chauffé par convection avec les parois de la cavité, et en ressort vers le bâtiment. L'énergie récupérée par le passage, permet le chauffage passif du bâtiment. Il n'y a pas de renouvellement d'air pour le bâtiment.
- *Out – In* : De la même manière, l'air chauffé dans la cavité entraîne un écoulement ascendant. L'air neuf, provient de l'extérieur, et est chauffé dans la lame d'air. Il est alors « aspiré » vers l'intérieur du bâtiment. Il y a donc renouvellement d'air du bâtiment, avec de l'air qui est préchauffé par son passage dans la lame d'air.
- *In – Out* : Dans ce cas, l'air chauffé dans la lame d'air entraîne un écoulement de l'intérieur vers l'extérieur. L'air du bâtiment, entre en partie basse et est évacué vers l'extérieur en partie haute. Complété par une autre entrée d'air pour le bâtiment, ce système permet le renouvellement d'air passif du bâtiment, c'est-à-dire de la ventilation naturelle.
- *Out – Out* : L'air extérieur entre en partie basse, s'échauffe dans la lame d'air et ressort vers l'extérieur. Le passage de l'air permet l'évacuation d'une partie de l'énergie solaire incidente, et limite ainsi les apports de chaleur vers le bâtiment.

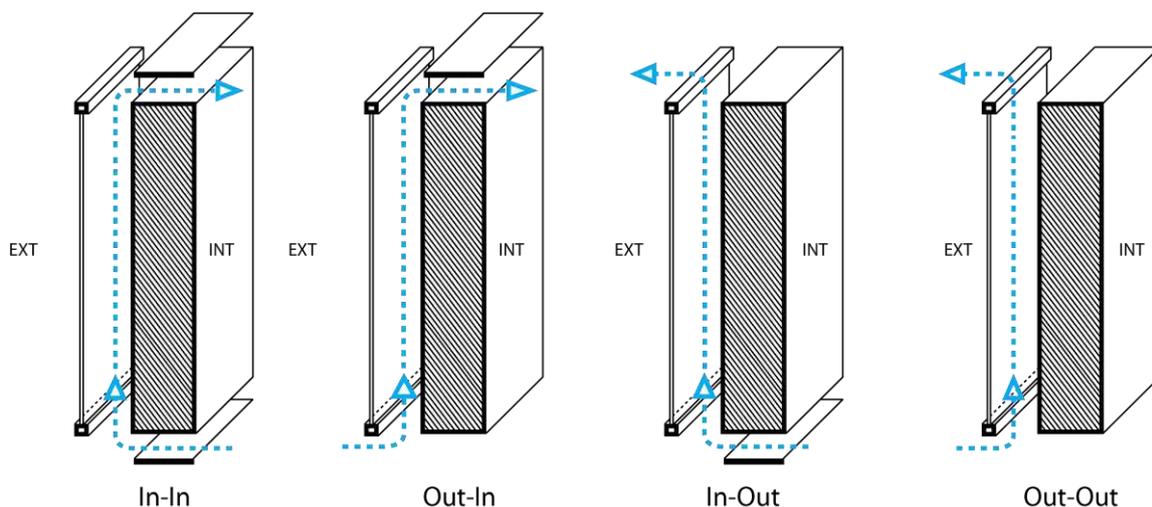


Figure 1.1 : Illustration des quatre configurations étudiées pour la convection naturelle entre deux plans chauffés, In-In, In-Out, Out-Out

Dans la suite, nous présentons les différents systèmes solaires passifs de façade, en précisant à quelle catégorie de la typologie ici définie, ils appartiennent. Nous centrons la présentation sur la chronologie du développement de ces systèmes et sur la recherche associée. L'objectif est de voir quelle était la motivation de ces études, comment la performance de ces systèmes était étudiée, et les moyens mis en place.

1.2 Les différents systèmes solaires passifs de façade

1.2.1 Le mur Trombe-Michel, solution solaire de chauffage passif

L'idée du mur Trombe-Michel, du nom de ses inventeurs, Félix Trombe et Jacques Michel, a été proposée dans les années 1950. Elle repose sur l'exploitation du phénomène de tirage thermique pour chauffer une pièce. Il s'agit de capter l'énergie solaire incidente et ensuite de la redistribuer dans le bâtiment associé.

Le mur Trombe est constitué d'une paroi vitrée placée devant un mur épais à forte inertie et faiblement isolé dont la face extérieure est souvent peinte en noir. Des clapets en parties hautes et basses permettent de fermer les entrées et sorties d'air et d'ainsi de possiblement complètement fermer la lame d'air. La figure 1.2 montre un exemple de mur Trombe.



Figure 1.2 : Mur Trombe du parc national Zion, Utah États Unis, étudié par Torcellini et Pless (2004)

Le fonctionnement du mur Trombe est différencié en été et en hiver. En hiver, le rayonnement solaire incident est absorbé par la face extérieure du mur, l'effet de serre permet l'accumulation de

chaleur. L'air chauffé en se dilatant induit une circulation naturelle depuis l'ouverture basse vers l'ouverture haute. Cette circulation permet de récupérer la chaleur stockée et ainsi de chauffer passivement la pièce associée. Le mur correspond ainsi au cas *In-In* sur la figure 1.1.

L'hiver en l'absence de rayonnement incident les clapets bas et hauts doivent être fermés de telle manière à limiter la convection et ainsi les transferts de chaleur.

En été, en présence de soleil, les clapets sont fermés pour limiter les apports de chaleur.

Les études sur les performances du mur trombe ont commencé à la fin des années 1960. Elles se sont notamment basées sur le cas de l'immeuble de démonstration construit à Odeillo par Félix Trombe, ingénieur du CNRS et Jacques Michel, architecte.

Akbari et Borgers (1979) étudient la convection naturelle laminaire qui prend place pour un cas de mur trombe en 1979, avant d'en étudier le caractère turbulent (1984) qui se développe à partir d'une certaine hauteur.

Burek et Habeb (1997) évaluent le débit de l'écoulement de l'air dans un mur trombe en fonction de différents paramètres. Il trouve que l'épaisseur de la lame d'air n'a pas d'impact sur l'efficacité.

Torcellini et Pless (2004) évaluent la performance d'un mur trombe installé sur une petite maison dans l'Utah, aux Etats Unis. La puissance maximale atteinte est de 89 W/m^2 , et l'efficacité moyenne, définie comme le rapport entre la chaleur donnée au bâtiment, et l'énergie solaire incidente est de 13 %.

Un travail de compilation de différentes études sur le mur Trombe, présentant un certain nombre d'installation de mur Trombe et leurs performances a été réalisée par Saadatian *et al.* (2012). Ils en concluent les enjeux et les opportunités associés au développement de ce type de système solaire passif.

1.2.2 Le SolarWall

En 1975, le brevet pour le « SolarWall system » est déposé par Schoenfelder. Le SolarWall est un collecteur métallique qui permet de « capter l'énergie solaire et de la convertir en chaleur pour le chauffage » (figure 1.3). La plaque extérieure peut être opaque et alors le plus souvent métallique et percée. Le rayonnement solaire incident sur cette plaque métallique extérieure, induit un échauffement de l'air situé derrière et ainsi un mouvement de convection naturelle. Selon la typologie définie, c'est un système *Out-In*, selon la typologie de la figure 1.1.

Plusieurs évolutions du SolarWall ont abouti à des systèmes de ventilation mécanique pour favoriser l'écoulement ascendant dans la lame d'air. L'entreprise Solarwall commercialise cette solution, dont on retrouve quelques cas d'installation en France, le plus souvent sur des bâtiments ayant de grandes façades opaques comme des supermarchés.



Figure 1.3 : Illustration du SolarWall (source: www.solarwall.com)

Leon et Kumar (2007), présentent un modèle de SolarWall et analysent les performances en faisant notamment varier la porosité et le coefficient d'absorption du collecteur métallique. L'application envisagée est le séchage de produits alimentaires en Asie, comme alternative aux collecteurs en verre, au prix plus élevé.

1.2.3 Les cheminées solaires, solution de rafraîchissement passive par ventilation naturelle

Les cheminées solaires sont un autre type de système s'appuyant sur le phénomène de tirage thermique. L'objectif de ces systèmes est de favoriser la ventilation naturelle en été, c'est-à-dire le renouvellement d'air et le rafraîchissement du bâtiment sans assistance mécanique. L'entrée d'air se fait vers l'intérieur, et la sortie vers l'extérieur, c'est un système de type *In-Out* (figure 1.1). La figure 1.4 illustre un cas de cheminée solaire placé sur la toiture.

En été, en présence d'apports solaires, la chaleur absorbée derrière le vitrage induit un écoulement de l'air intérieur du bâtiment vers l'extérieur (figure 1.1, cas *In-Out*), la différence de pression d'air dans le bâtiment est équilibré par une entrée d'air qui se fait en un autre point, le plus souvent en partie basse, et en un point « frais ».



Figure 1.4 : Cheminée solaire du lycée français de Damas, en Syrie par Yves Lion

Les géométries de ces solutions sont variées, les capteurs solaires peuvent être inclinés. Hamdy et Fikry (1998) réalisent une étude numérique pour des solutions de cheminée solaire inclinées, et conclut qu'un angle de 60° maximise le débit et ainsi la performance de la ventilation naturelle pour la région étudiée (Egypte).

Bansal *et al.* (1993) proposent un modèle pour une cheminée solaire destinée à améliorer la ventilation naturelle d'un bâtiment. Hirunlabh *et al.* (1999) étudient l'efficacité d'un mur solaire métallique pour la ventilation naturelle d'une maison, et déterminent l'épaisseur de lame d'air qui maximise le débit d'évacuation d'air. Ong (2003) développe un modèle mathématique de cheminée solaire pour étudier la performance en fonction du flux solaire incident pour des épaisseurs de lame d'air de 10, 20 et 30 cm. Les vitesses d'air mesurées sont entre 0,25 et 0,4 m/s.

Le débit de renouvellement d'air de 150 m³/h a été mesuré par Mathur *et al.*, (2006), pour une cheminée solaire verticale de 1m de haut, une épaisseur de lame d'air de 0,35m, un flux d'énergie solaire incident de 700 W/m².

1.2.4 Les bardages

Les bardages sont des revêtements de mur extérieur. Le bois est souvent utilisé, mais ils peuvent aussi être métalliques ou en terre cuite. L'élément de bardage est posé sur des liteaux, qui délimitent alors une lame d'air. Plusieurs configurations de liteaux sont possibles : posés à l'horizontal, vertical ou croisés.

Dans la volonté d'améliorer la modélisation des bâtiments, la prise en compte des phénomènes de transfert au niveau de l'enveloppe s'étend au transport d'humidité et d'air (constat de départ du projet ANR PACIBA, 2006). Nous avons expliqué dans l'introduction que le bardage est une solution pertinente pour le séchage d'un isolant placé à l'extérieur d'un mur et donc pour éviter la dégradation des performances de l'isolant par l'humidité. Ainsi au niveau de l'enveloppe, le domaine d'étude s'étend au possible bardage placé devant la paroi. Cette amélioration de la modélisation permet alors une meilleure conception de ces systèmes, et une meilleure prédiction de leurs impacts sur le bâtiment. Ce point est une des motivations des travaux sur les bardages.

La réglementation thermique française propose de modéliser la présence d'un bardage par l'augmentation de la résistance superficielle extérieure de la paroi (de 0,05 à 0,13 m².K/W) qui est munie d'un bardage. Cette rapide modélisation est justifiée par le fait que le bardage sépare le mur de l'environnement extérieur et le place ainsi dans la même configuration que la face intérieure de la paroi.



Figure 1.5 : Exemple des maisons du quartier Arrousets à Bayonne qui intègrent un bardage pin maritime ventilé devant une isolation par l'extérieur

Straube et Finch (2009) ont réalisé une chronologie des différents travaux sur l'efficacité du séchage des bardages. Mayer et Kunzel (1983) ont présenté des résultats sur l'efficacité de la convection

naturelle derrière bardage pour le séchage. Des séries de mesures de vitesse d'air dans la lame d'air derrière de grands panneaux de façades ventilées sur un bâtiment de trois étages ont été réalisées. Les deux forces qui agissent sur le débit de renouvellement d'air sont la différence de pression due au vent et l'écoulement induit par l'énergie solaire absorbée. Des vitesses d'air ont été mesurées entre 0,05 et 0,15 m/s lorsque la vitesse du vent était de 1 à 3 m/s. Ils ont montré que la direction du vent influence plus la vitesse d'écoulement que la vitesse du vent. De ces expérimentations, ils ont conclu qu'une épaisseur de lame d'air de 20 mm était suffisante pour assurer le séchage.

Plus récemment, Mitogo Eseng (2012) analyse le comportement thermique de deux bardages bois en pin. Il analyse les performances dans les cas où la lame d'air est ouverte et fermée. L'attention est notamment portée sur l'impact de l'épaisseur du bardage et de la lame d'air sur la capacité à évacuer la chaleur.

Falk *et al.* (2012) ont réalisé des mesures sur un mur orienté sud pour bardages fixés sur liteaux horizontaux ou verticaux. Les liteaux horizontaux empêchent l'effet de tirage vertical. Le renouvellement d'air est alors diminué de près de 70%, et repose sur l'effet du vent. Dans le cas de liteaux verticaux, le débit associé au vent est irrégulier et ne dépend pas de l'angle d'incidence du vent. Quand l'écoulement ascendant induit par le rayonnement solaire est bien développé, l'influence du vent est alors nulle, ce qui rend plus facile la prédiction du débit de renouvellement d'air.

Pour le cas d'un bardage ajouré, l'écoulement n'est plus seulement ascendant, l'air entre et sort de la lame d'air sur toute la hauteur du mur. Des expériences en laboratoire menées par Sanjuan *et al.* (2011), ont permis d'identifier cet écoulement horizontal par de la mesure par vélocimétrie laser. Des modèles numériques ont par la suite été développés pour permettre d'analyser l'écoulement qui prend place par Sanjuan *et al.* (2011).

Labat *et al.*, (2012) considèrent le cas d'un bardage bois posé sur des liteaux verticaux. Le bardage est ajouré, un espace de 8mm est laissé entre les lames. L'écoulement est étudié notamment par CFD (*Computational Fluid Dynamics* – Mécanique des Fluides Numérique), et une corrélation établie pour prédire l'évolution de la vitesse d'écoulement ascendant dans la lame d'air en fonction de la hauteur. Cette corrélation pour l'écoulement derrière le bardage est ensuite intégrée dans un modèle à l'échelle du bâtiment, fournissant de bons résultats.

De ces travaux, on remarque que la plupart se concentre sur une étude fine de l'écoulement dans la lame d'air mais étudie peu l'impact que le bardage a sur le comportement du bâtiment. Nous n'avons pas trouvé d'études proposant une modélisation simple des bardages permettant leur intégration dans un modèle de simulation thermique dynamique.

Il faut aussi remarquer que différents auteurs relèvent l'influence du vent sur l'écoulement, mais ne sont pas en accord quant à son influence.

1.2.5 Les façades double peaux, pour chauffage solaire passif et ventilation

Une façade double peau est une façade simple traditionnelle doublée à l'extérieur par une façade essentiellement vitrée, comme on peut le voir sur la figure 1.6. L'objectif d'une telle façade est multiple : diminuer les déperditions thermiques par l'enveloppe, créer une isolation phonique, apporter un effet architectural. La double peau permet alors par effet de serre de générer un

écoulement, qui peut être utilisé soit pour chauffer le bâtiment (en hiver) soit pour le rafraîchissement du bâtiment par ventilation naturelle (en été).

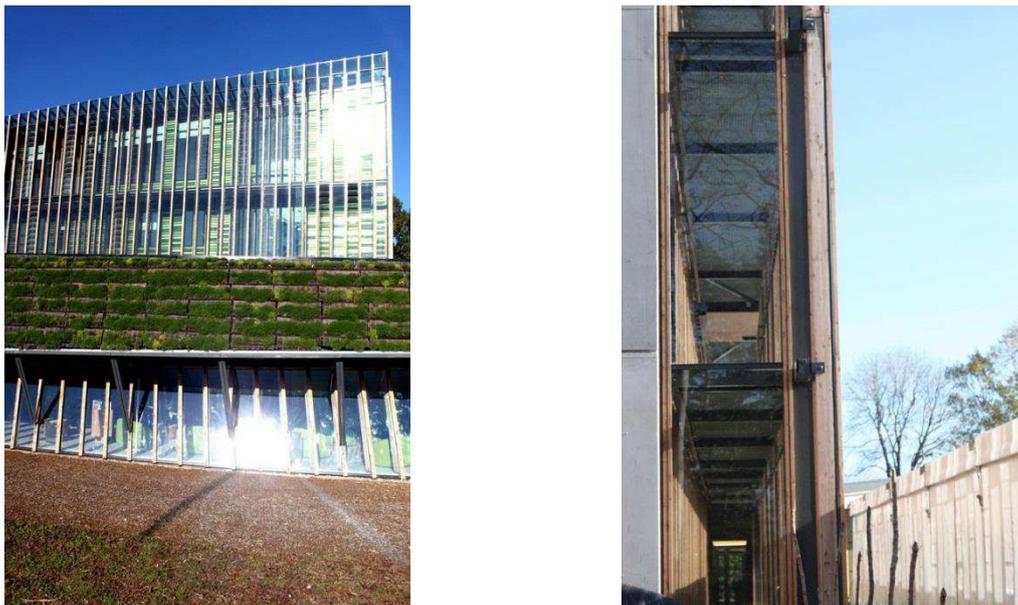


Figure 1.6 : Illustration d'une façade double peau : le bâtiment de l'Office 64 à Bayonne. Architecte P. Arotcharen.

La zone double peau est généralement une zone inoccupée qui se trouve à environ 1 m de la façade du bâtiment. Cette distance entre les deux peaux, visible sur la figure 1.6, se justifie notamment par la nécessité d'accès pour l'entretien des façades.

Il faut remarquer que les ouvertures de la lame d'air peuvent être multiples, et être aussi bien orientées vers l'intérieur que l'extérieur. Ainsi, selon son fonctionnement, la façade double peau peut appartenir à différentes catégories de la typologie définie des systèmes solaires passifs de façade et illustrée dans la figure 1.1.

Tout d'abord, la lame d'air peut être complètement fermée. Ce peut être le cas en hiver, de telle manière à bénéficier des apports transmis par les deux couches de vitrage vers le bâtiment, et de limiter les pertes par conduction de par la température élevée dans la double peau.

Ensuite, le cas *In-In*, peut être réalisé en hiver, par l'ouverture de fenêtre de l'enveloppe structurelle vers la double peau. En présence d'apports solaires potentiels, l'ouverture des fenêtres permet le mélange de l'air du bâtiment avec l'air de la double peau.

Le cas *Out-In*, est lui aussi envisageable, de telle manière à préchauffer l'air dans la double peau avant qu'il n'entre dans le bâtiment par des fenêtres ouvertes.

En été, de manière à éviter les apports de chaleur solaire, on favorise l'évacuation de la chaleur par transport convectif en ouvrant vers l'extérieur en parties basse et haute. C'est le cas *Out-Out*, illustré sur la figure 1.1.

Hensen *et al.* (2002) étudient la pertinence de façades double peaux et particulièrement le fonctionnement *Out-Out* l'été, pour la construction de nouveaux bâtiments tertiaires. Ils utilisent deux types d'approche de modélisation, la première utilisant un réseau de bilans d'énergie et de masse, et la deuxième basée sur des simulations par CFD. Ils concluent que pour l'aide à la conception la première est la plus adaptée car plus rapide à mettre en œuvre mais que l'approche CFD peut être utile pour des études plus avancées.

Gratia et De Herde (2004) utilisent le logiciel TAS pour étudier l'impact d'une telle double peau sur le comportement thermique du bâtiment, et notamment évaluer l'efficacité de la ventilation naturelle nocturne (*cas In-Out*) comme solution de rafraîchissement.

L'application des modèles s'est élargie par la suite, Stec *et al.* (2005) proposent un modèle de double peau prenant en compte l'impact de plantes placées entre les deux peaux. Dans une autre étude, Stec *et al.* (2005) travaillent sur l'intégration de la double peau avec les systèmes HVAC (Chauffage, Ventilation, Climatisation), du bâtiment associé. Ainsi, les réductions de consommation d'énergie générées grâce à la double peau peuvent contrebalancer les coûts énergétiques de sa mise en œuvre.

1.2.6 Les plantes grimpantes comme protections solaires



Figure 1.7 : Bâtiment Consorcio à Santiago au Chili avec une façade végétalisée, de l'architecte Enrique Brown. Vue extérieure et intérieure pour les saisons été et hiver.

La végétation autour d'un bâtiment a non seulement un impact aux niveau psychologique et visuel mais elle améliore également les conditions microclimatiques. Les plantes grimpantes caduques voient naturellement leur facteur solaire évoluer pendant l'année. Il est faible en hiver, quand il y a

besoin d'apports radiatifs, et élevé l'été quand il faut les maîtriser. Ce sont donc des protections solaires pertinentes.

L'utilisation des plantes comme protections solaires peut prendre deux formes. Les « living wall » sont des systèmes directement posés sur un mur, qui accueille des plantes variées qui sont alors arrosées. Les « green façades » sont des plantes grimpantes sur des supports dédiés devant des façades vitrées, comme on peut le voir sur l'exemple du bâtiment Consorcio d'Enrique Brown à Santiago au Chili (figure 1.7).

Hoyano (1988), étudie un écran végétal en vigne caduque devant une véranda et une vigne verte persistante devant un mur opaque. Il explique que cette recherche est motivée par une attente des architectes. Il évalue alors l'impact de ces solutions sur le bâtiment. Holm (1989) reprend la quantification des différentes composantes du bilan énergétique au niveau d'une feuille réalisée par Minke et Witter (1983) et analyse les propriétés radiatives des feuilles de vigne vierge.

Ip *et al.* (2010) étudient l'impact de plantes grimpantes utilisées comme protections solaires devant une paroi vitrée. Le traitement d'image est utilisé pour déterminer le LAI (Leaf Area Index) c'est à dire le taux de recouvrement des feuilles, au cours de l'année. Celui-ci est utilisé pour établir une fonction qui traduit la transparence du système au cours de l'année, à la façon d'un facteur solaire dynamique.

Un modèle détaillé de l'ensemble des échanges de chaleur (radiatif, convectif, enthalpie latente de changement d'état) prenant place est proposé par Susorova *et al.* (2013) dans le cas de plantes grimpantes sur un mur opaque en fonction, et validé par comparaison avec des mesures sur une durée d'une semaine. Une comparaison est faite entre un mur nu et un mur avec des plantes grimpantes pour des journées ensoleillées. La température de la surface extérieure du mur peut être réduite jusqu'à 13°C, et la résistance thermique équivalente des plantes est alors de 0,71 W/m².K.

1.2.7 Analyse

Nous avons présenté un certain nombre de systèmes solaires passifs de façade, et nous avons construit une typologie simple afin de mieux les définir. Les performances de tous ces systèmes reposent sur les transferts dans la lame d'air. En effet, pour tous ces systèmes il s'agit de maximiser l'évacuation de chaleur dans la lame d'air.

Les études ici relevées se sont concentrées sur la maximisation de la performance de ces systèmes. Peu abordent l'intégration de ces systèmes dans des plateformes de simulation thermique dynamique de bâtiment. Pourtant, le comportement du bâtiment est fortement lié aux performances de ces systèmes.

Ensuite, les études ont surtout porté sur les systèmes pour lesquels il y a une interaction directe avec le bâtiment, c'est à dire en lien avec l'air intérieur du bâtiment, donc les cas *In-In*, *In- Out*, et *Out-In*. Le cas des systèmes dits *Out-Out* est moins abordé. Quand il l'est, c'est surtout pour étudier la capacité à sécher les matériaux constitutifs du mur.

Nous proposons donc d'étudier plus particulièrement ces cas simples de protections solaires verticales placées devant un mur et qui ont pour objectif de limiter les apports solaires.

De plus, leurs modélisations dans les plateformes de simulation sont souvent faites sous la forme de l'augmentation d'une résistance thermique extérieure, ce qui paraît être une modélisation faible.

1.3 La modélisation des transferts de chaleur dans une cavité ventilée naturellement

L'étude de l'écoulement entre deux plaques chauffées a abouti à de nombreux modèles. Ces modèles s'appuient sur des choix de représentation des phénomènes entrant en jeu, en particulier pour les échanges radiatifs et les échanges convectifs. Pour ces premiers, il s'agit d'une part des échanges radiatifs entre l'extérieur et le parement et d'autre part de ceux qui ont lieu au sein du système solaire passif étudié.

Les modèles décrivant la convection naturelle qui prend place au sein de la lame d'air ont pour objectif de déterminer le coefficient de convection et le débit de renouvellement d'air et peuvent être répartis en 3 familles : l'approche numérique, qui correspond à la résolution des équations de Navier-Stokes par les méthodes de CFD, et deux approches analytiques, l'une en se centrant sur l'effet cheminée, et l'autre sur les pertes de charge de l'écoulement.

1.3.1 Les échanges radiatifs

Dans ce paragraphe, l'objectif est de présenter les bilans d'énergie liés aux échanges radiatifs dans le système considéré. Nous présentons ici les phénomènes entrant en jeu et les hypothèses correspondant aux choix de modélisations que l'on trouve dans la littérature scientifique.

1.3.1.1 Rayonnement solaire et distinction entre CLO et GLO

Tous les corps émettent un rayonnement électromagnétique, qui dans le cadre de transfert de chaleur peut être appelé rayonnement thermique. La longueur d'onde associée au rayonnement émis dépend de la température de la surface émettrice, et la loi de Planck permet de donner la longueur d'onde du maximum d'émission en fonction de la température. La température de la surface extérieure du soleil est de l'ordre de 5870 K, de sorte que son rayonnement électromagnétique est essentiellement dans le visible (entre 0,4 μm et 0,8 μm). Pour des températures de surfaces de corps comme ceux que l'on trouve dans le système ici étudié, le rayonnement associé se trouve dans l'infrarouge (10 μm).

Il faut remarquer que l'atmosphère filtre le rayonnement solaire, et c'est majoritairement l'énergie solaire correspondant à la plage 0,25 à 2,5 μm qui atteint la surface terrestre.

Le bilan d'énergie radiative à effectuer sur un corps à la surface terrestre doit aussi inclure le rayonnement de l'environnement qui comprend :

- Le rayonnement de l'atmosphère, son émission propre et la part réfléchie du rayonnement terrestre, qui est appelé rayonnement du ciel,
- Le rayonnement des surfaces en regard du corps considéré.

Il apparait alors que l'on peut distinguer deux types de rayonnement, comme le fait la norme EN ISO 9288 :1989. « Isolation thermique -- Transfert de chaleur par rayonnement -- Grandeurs physiques et définition » :

- Le rayonnement en courtes longueurs d'onde (CLO) d'origine solaire direct et diffus (0,25 μm à 2,5 μm)
- Le rayonnement de grandes longueurs d'onde (GLO) émis par des sources terrestres (ENV) proches de la température ambiante (2,5 μm à 100 μm)

Ce choix se justifie par le fait que les éléments transparents comme le vitrage ont un comportement sélectif : ils se comportent comme des passes hauts, laissant passer les ondes courtes (de hautes fréquences) mais pas les longues (de basses fréquences). Ainsi leurs propriétés radiatives doivent être différenciées selon ces deux plages. La limite entre les deux est placée à 2,5 μm .

La puissance rayonnée par un corps est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann. Ainsi une surface d'émissivité ε à la température T émet une densité de flux radiatif égale à :

$$\varphi = \varepsilon \sigma T^4$$

1.3.1.2 La prise en compte du phénomène de multi-réflexion entre les deux plaques

Pour le flux radiatif en CLO incident sur une façade le phénomène de multi-réflexion intervient. La part de rayonnement transmis par la protection solaire semi-transparente, peut ensuite être soit absorbée, soit réfléchiée par le mur. Ensuite cette part réfléchiée, peut à nouveau être transmise, réfléchiée ou absorbée par la face interne de la protection solaire, comme illustré sur la figure 1.8.

On se base sur l'étude de Rodriguez *et al.* (2007) qui décrit les bilans radiatifs 1D pour un produit recouvert d'un film semi-transparent et soumis au rayonnement solaire.

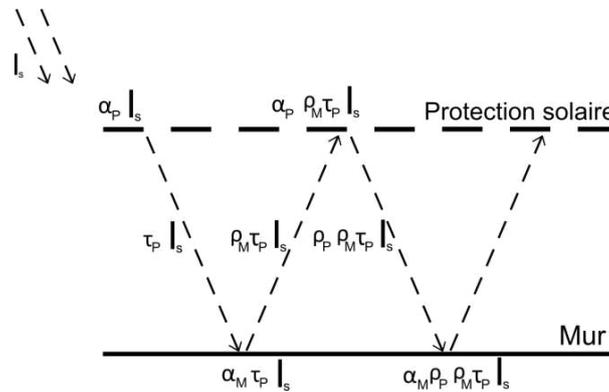


Figure 1.8 : Schéma du phénomène de multi-réflexion du rayonnement CLO

Ainsi, pour la sollicitation radiative extérieure reçue par la protection solaire sur sa face interne (point P_i), en CLO, après avoir écrit la forme développée, et reconnu une série géométrique, la forme simplifiée s'écrit :

$$\varphi_{\text{CLO},P_i} = \frac{\alpha_{P,\text{CLO}} * \tau_{M,\text{CLO}}}{1 - \rho_{P,\text{CLO}} * \rho_{M_i,\text{CLO}}} I_s \quad (\text{E 1.1})$$

1.3.1.3 Echange radiatif entre deux surfaces

Les flux émis sont calculés à partir des températures de surface et des propriétés radiatives des matériaux en GLO. Les formes développées des échanges entre les deux surfaces sont prises en compte.

Pour le bilan d'énergie radiative entre deux surfaces à températures T_1 et T_2 d'émissivité ε_1 et ε_2 se faisant face à écart constant, et dont la distance de l'une à l'autre est faible devant leur hauteur, le flux net perdu par la surface 1 s'écrit :

$$\varphi_{\text{GLO}} = \sigma \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (\text{E 1.2})$$

Pour l'intégration dans le modèle numérique, l'expression des bilans radiatifs est linéarisée, et on a alors :

$$\varphi_{GLO} = h_{rad} * (T_1 - T_2) \quad (E 1.3)$$

Avec

$$h_{rad} = \sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) / \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \quad (E 1.4)$$

h_{rad} est le coefficient d'échange radiatif entre les deux surfaces. Il dépend de la température de ces surfaces.

1.3.1.4 Echange entre la surface extérieure de la protection solaire et l'environnement

La densité de flux incident en GLO incident sur la surface externe du complexe, s'écrit :

$$\varphi_{GLO,ciel-P_o} = (\varepsilon_{ENV}\sigma FT_{ext}^4 + \sigma(1 - F)T_{ciel}^4) \quad (E 1.5)$$

Avec F le facteur de forme entre la surface considérée et l'environnement. T_{ciel} est la température de brillance du ciel, c'est-à-dire la température telle qu'en appliquant la loi de Stefan-Boltzmann pour le rayonnement, on retrouve la densité de flux radiative en GLO provenant de l'atmosphère. Pour la suite, nous considérons que l'émissivité de l'environnement est de 1, les surfaces extérieures étant mates, et par simplification.

1.3.2 Les échanges convectifs

1.3.2.1 Caractérisation de la convection naturelle

Les transferts de chaleur convectifs qui prennent place à l'échelle de la cavité ouverte d'un système solaire passif de façade sont de deux types. D'abord les échanges par transport convectif correspondant à l'énergie transportée par l'air dans son écoulement vertical, et sont donc associés au débit de renouvellement d'air. Ensuite, les échanges convectifs entre les surfaces de la cavité et l'air qui sont caractérisés par un coefficient de convection. Ces données sont représentées sur la figure 1.9. On remarque aussi, comme précisé sur la figure, que le profil de l'écoulement est de forme parabolique, mais par simplification on considère une vitesse moyenne, qui est alors directement liée au débit de renouvellement d'air.

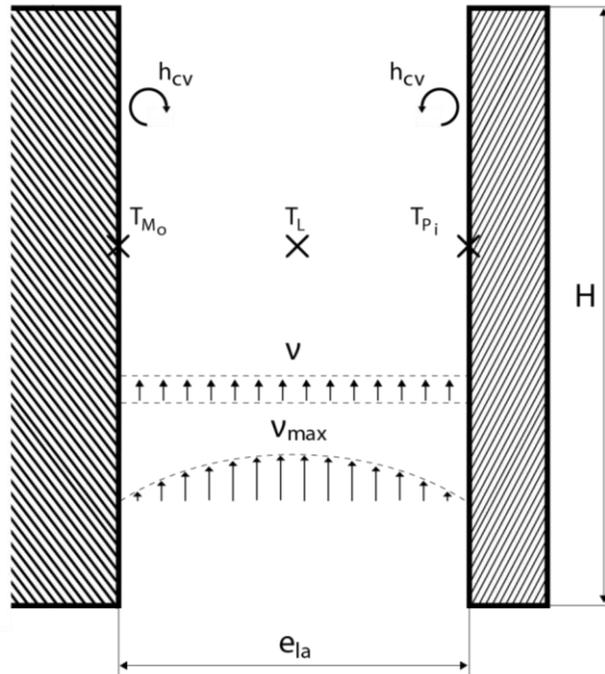


Figure 1.9 : Illustration du profil d'écoulement vertical et de la vitesse moyenne dans une cavité chauffée

Pour la convection naturelle entre deux plaques verticales chauffées asymétriquement, l'écoulement dépend essentiellement de la forme de la cavité, de la chaleur totale fournie à l'air, et de sa distribution, Aung *et al.* (1972). Les nombres adimensionnés caractéristiques sont ceux de Rayleigh, de Prandtl et le rapport de forme de la cavité (rapport entre épaisseur et hauteur de la lame d'air). Ici, on peut considérer que le nombre de Prandtl est constant pour l'air et égale à 0,71. Le nombre de Rayleigh caractérise le transfert au sein du fluide, c'est à dire le type d'écoulement. Inférieur à une première valeur limite, le transfert est essentiellement conductif, au-delà, c'est la convection qui domine, l'écoulement étant laminaire et enfin, au-delà d'une autre valeur critique, il y a écoulement turbulent.

Le nombre de Rayleigh se calcule à partir du nombre de Grashof. Pour la convection naturelle, qui prend place entre deux plaques verticales, associé à un mouvement de renouvellement d'air sur toute la hauteur H, comme sur la figure 1.9, le nombre de Rayleigh est donné par :

$$Ra_H = Gr_H * Pr = \frac{g\beta\rho_{air}^2 H^3}{\mu^2} \left(\frac{T_{Mo} + T_{Pi}}{2} - T_{ext} \right) * Pr \quad (E 1.6)$$

Les échanges convectifs à l'interface solide-air sont décrits par le nombre de Nusselt, qui pour l'écoulement entre deux plaques est défini par :

$$Nu = \frac{h_{cv} * 2e_{la}}{\lambda_{air}} \quad (E 1.7)$$

Les modèles déterminant le coefficient de convection et le débit de renouvellement d'air peuvent être répartis en trois familles que nous présentons ici, l'approche numérique, qui correspond à la résolution des équations de Navier-Stokes par les méthodes de CFD, et deux approches analytiques, l'une se centrant sur l'effet cheminée, et l'autre sur les pertes de charge de l'écoulement.

1.3.2.2 Approche numérique CFD

L'approche numérique consiste en l'utilisation des équations de Navier-Stokes sous certaines hypothèses simplificatrices, afin de déterminer la vitesse d'écoulement de l'air entre deux plaques

chauffées asymétriquement. Les équations de conservation de la masse, de la vitesse et de l'énergie sont ainsi utilisées.

Deux approches numériques ont été utilisées depuis les premiers modèles numériques des années 1960. La première, utilisée par Aung *et al.* (1972) et Kaiser *et al.* (2004) s'appuie sur l'approximation de Boussinesq en considérant tous les paramètres physiques constants, exceptée la densité volumique. La réécriture des équations de Navier-Stokes fournit alors un problème dont les solutions peuvent être calculées numériquement relativement simplement.

La deuxième considère les équations de Navier-Stokes avec des paramètres non constants, comme le font Kaiser *et al.* (2004) et Gan en (1998) et (2006). Cette méthode est rendue possible par le développement des outils de calcul informatique, et les techniques de résolution de la CFD.

Pour Aung *et al.* (1972) le terme moteur considéré est soit la différence de température entre la température de surface des plaques et la température de l'air extérieur, soit les flux de chaleur au niveau des plaques à l'interface entre le solide et l'air. Le nombre de Grashof est alors défini en conséquence. De la même façon, des études de CFD considèrent comme conditions à la limite de la lame d'air soit des températures fixes comme le font Chami et Zoughaib (2010), soit des flux comme Gan (2011).

Ensuite, le nombre de Nusselt et le débit sont calculés pour différents nombres de Rayleigh et de rapports de forme. Des corrélations, pour le coefficient de convection et la vitesse d'air moyenne, sont ensuite proposées. Aung *et al.* (1972) réalisent un certain nombre de calculs pour des nombres de Rayleigh et débits choisis. Ils constatent alors des relations asymptotiques entre nombre de Rayleigh et nombre de Reynolds, et nombre de Rayleigh d'une part et nombre de Nusselt.

Zamora et Kaiser (2009) étudient l'écoulement (laminaire et turbulent) dans une cheminée solaire pour différents nombres de Rayleigh et différents rapports de forme, en utilisant un code numérique. Des corrélations donnant la valeur de rapport de forme qui maximise le nombre de Nusselt, pour de valeurs de nombre de Rayleigh comprises entre 10^5 et 10^{12} ont été établies. Plus le nombre de Rayleigh est élevé, plus le rapport de forme doit être faible pour maximiser les échanges convectifs. Le débit maximal n'est pas atteint pour la valeur maximale du Nusselt, ce qui s'explique par le fait qu'en régime turbulent, des inversions d'écoulement prennent place, favorisant les échanges convectifs mais pas le renouvellement d'air.

Gan (2011) étudie les cheminées solaires, et fournit des expressions générales permettant de calculer d'une part le nombre de Nusselt en fonction du rapport de forme et du nombre de Rayleigh, et d'autre part le nombre de Reynolds en fonction du nombre de Rayleigh et du nombre de Nusselt, permettant ainsi d'obtenir le débit. Il décompose ces relations sur les intervalles sur lesquelles elles sont valables. Il faut noter que ces relations sont valables pour des flux allant de 100 à 1000 W/m², et pour des répartitions variées des flux entre les deux faces de la cavité.

Ces méthodes ont pour avantage une description fine de tout l'écoulement dans la lame d'air, elles permettent aussi d'analyser la nature de l'écoulement de manière locale et notamment sa possible hétérogénéité le long du canal. Mais ces résultats sont établis pour des configurations et des entrées spécifiques, limitant de ce fait leur exploitation pour la modélisation des échanges dans des configurations réelles de protections solaires.

1.3.2.3 Approche analytique

Les travaux portant sur l'étude numérique de la circulation d'air dans un canal entre deux plaques chauffées verticalement montrent que les écoulements sont relativement complexes. Certaines

études se sont ainsi intéressées à la partie turbulente de ces écoulements, d'autres à la variation de la vitesse sur la hauteur et la largeur en fonction du caractère asymétrique du chauffage.

Pour évaluer l'efficacité des cheminées solaires ou murs Trombe, c'est le débit de renouvellement d'air et le coefficient de convection entre l'air et les faces de la cavité qui sont nécessaires. Ainsi d'autres études se sont centrées sur ces objectifs et des modèles plus simples, c'est-à-dire nécessitant moins de capacités de calcul ont été construits.

1.3.2.3.1 Approche par considération de l'effet cheminée

La méthode proposée par Bansal *et al.* (1993) s'appuie sur l'écriture des profils de pression à l'intérieur et à l'extérieur de la lame d'air, en introduisant les pertes de charge linéaires dans la lame d'air. Pour cela il utilise l'approximation de Boussinesq et considère l'air comme un gaz parfait. Les profils de pression sont supposés linéaires. En connaissant les pressions à l'ouverture et à la sortie, les débits peuvent être déterminés. Ce sont des relations entre différence de pression et caractéristiques de l'ouverture qui sont utilisées. Allard (1998) présente deux méthodes. Pour des petites sections, des relations entre débit et différences de pression sont établies sous la forme de lois de puissance et peuvent être utilisées. Pour de grandes ouvertures, l'application de loi de Bernoulli sur un chemin traversant l'ouverture et l'application de la conservation de la masse est une autre méthode conduisant au débit. Dans ce cas, un coefficient dit de décharge C_d , qui doit être établi expérimentalement, est introduit ; il traduit le caractère non idéal du mouvement d'air, notamment au niveau des ouvertures.

Ong (2003) utilise cette approche dans sa proposition de modèle mathématique d'une cheminée solaire, et utilise comme coefficient de décharge une valeur proposée par Flourentzou *et al.* (1998). Il précise que la température moyenne de la lame d'air est une moyenne pondérée de la température d'entrée dans la lame d'air et de sortie. Le coefficient de pondération est lui aussi établi expérimentalement, par Hirunlabh *et al.* (1999), et vaut 0,75.

Ainsi la vitesse moyenne d'écoulement dans la lame d'air est donnée par la formule suivante :

$$v = C_d * \frac{S_e}{\sqrt{1 + \frac{S_e}{S_s}}} \sqrt{\frac{2gH(\overline{T}_{la} - T_{ext})}{T_{ext}}} \quad (E 1.8)$$

A partir de l'expression de celle-ci, le nombre de Nusselt ensuite est déterminé en utilisant des corrélations établies pour un régime laminaire et pour un régime turbulent. Le coefficient de convection est alors calculé à partir du nombre de Nusselt.

1.3.2.3.2 Approche par l'écriture des pertes de charge

Cette méthode se centre sur la prise en compte de la forme de la cavité, et notamment de toutes les pertes de charge associées qui limitent l'écoulement.

En régime permanent, la pression motrice qui induit l'écoulement de l'intérieur de la lame d'air vers l'extérieur est à l'équilibre avec les pertes de pression le long de la cavité. Parmi celles-ci, on distingue la perte de charge linéaire liée au frottement le long d'une cavité, et les pertes de charge locales.

Cette égalité s'écrit :

$$\Delta p_{pm} = \Delta p_{fr} + \Delta p_{bas} + \Delta p_{haut} \quad (E 1.9)$$

Avec :

- Δp_{pm} la différence de pression motrice entre l'air extérieur et l'air dans la lame d'air
- Δp_{fr} la perte de charge linéaire due à l'écoulement laminaire (pertes de friction)
- Δp_{bas} la perte de charge locale associée à l'entrée de la cheminée
- Δp_{haut} la perte de charge locale associée à la sortie de la cheminée

Les pertes de charge font intervenir la vitesse d'écoulement dans la lame d'air qui est considérée comme constante sur la hauteur (pas d'accélération, ni de changement de forme de l'écoulement). On peut alors exprimer la vitesse d'air en fonction de la différence de pression motrice entre l'air extérieur et l'air intérieur.

Les différentes utilisations de cette méthode dans la littérature scientifique se différencient par leurs écritures des pertes de charge et de la pression motrice.

La norme EN 13363 intitulée « Dispositifs de protection solaire combinés à des vitrages - calcul du facteur de transmission solaire et lumineuse » utilise la loi de Hagen-Poiseuille pour un écoulement laminaire en régime établi pour déterminer la perte de charge linéaire de frottement. Ensuite, le coefficient de convection est déterminé en sommant celui obtenu pour une cavité fermée à nombre de Grashof équivalent, et un terme proportionnel à la vitesse d'air calculée.

Davidovic *et al.* (2012) recensent différentes méthodes analytiques permettant de calculer les pertes de charge. Ils les répartissent en quatre familles, dont ils discutent la validité et la complexité.

Falk *et al.*, (2013) mettent en place un protocole expérimental pour mesurer les différentes pertes de charge identifiées. Les géométries considérées sont de trois types : bardage posé sur des liteaux verticaux, des liteaux croisés, et des liteaux horizontaux (section verticale alors complètement obstruée). En laboratoire, un extracteur d'air est placé en série d'un bardage parfaitement étanche, et permet de faire varier le débit de renouvellement d'air. La perte de charge est déterminée à partir de la mesure de la pression avant et après la localisation de la perte de charge. Ils remarquent que plusieurs de ces pertes de charge dépendent de la vitesse d'écoulement. Pour le modèle utilisé, la pression motrice est calculée en prenant en compte l'effet cheminée mais aussi le vent incident. La perte de charge linéaire est calculée à partir de la formule de Darcy-Weissbach. A partir de mesures expérimentales en extérieur, Falk *et al.* (2012) constatent que le vent induit un écoulement irrégulier, et empêche une prédiction fine du débit de renouvellement d'air. Cependant, quand un écoulement fort est induit dans la lame d'air sous l'effet de forts apports de chaleur, l'écoulement lié au vent est supprimé.

1.3.3 Conclusion sur les modèles

L'étude de la littérature sur la modélisation des échanges de chaleur au niveau d'une lame d'air ventilée montre que les travaux ont été nombreux et que les approches utilisées peuvent varier. Ainsi concernant les échanges radiatifs, il apparaît que les choix de modélisation sont en très grande partie semblables à l'exception de la construction de la température de ciel. Par contre concernant les échanges convectifs, on peut considérer trois grandes catégories de modèle.

La première, numérique, correspond au calcul le plus fin, mais nécessite un calcul conséquent de CFD. Les corrélations établies peuvent alors être intégrées dans un modèle de transferts au niveau de la paroi, comme l'ont fait Chami et Zoughaib (2008). Les corrélations issues de ces calculs de CFD ont des domaines de validité restreints : ils ne sont valables que pour la configuration étudiée, mais aussi pour le flux de chaleur fourni à l'air considéré. La plupart des corrélations établies comme celles de Gan (2011) le sont pour des puissances relativement conséquentes (supérieures à 100 W/m²). On peut donc qualifier ces modélisations de fines mais peu souples.

La seconde qui décrit l'effet cheminée, nécessite des mesures expérimentales pour déterminer le coefficient de décharge. Là aussi, le domaine de validité est restreint.

Enfin la troisième basée sur l'écriture des pertes de charge dans la paroi est la plus souple, et comme l'ont fait Falk *et al.* (2012), elle est relativement évolutive en ajustant les coefficients de perte de charge qui peuvent être trouvés dans la littérature.

Nous verrons dans la suite de cette étude, quelle famille prédit le mieux les vitesses mesurées expérimentalement.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini une classification sommaire des systèmes solaires passifs de façade, et nous avons présenté différents systèmes que nous avons associés à cette classification. Parmi les systèmes solaires passifs de façade, nous retenons que les études que l'on trouve dans la littérature ont peu abordé les systèmes dits *Out-Out* comme les bardages ou les stores.

Les différents types de transfert prenant place à cette échelle ont été présentés. Pour les échanges conductifs et les échanges radiatifs aussi bien en CLO qu'en GLO, les différentes études que l'on trouve dans la littérature présentent toutes des méthodes similaires que l'on peut qualifier de classiques. Par contre, les échanges de chaleur dans la lame d'air liés à la convection sont plus complexes. Ainsi la convection se traduit par un transport convectif de chaleur et par des échanges convectifs entre les surfaces de la cavité ouverte et l'air qui y circule. Le premier se caractérise par le débit et le second par le coefficient de convection. Les modélisations de l'écoulement dans la lame d'air ont ainsi pour objectif de déterminer ces deux données.

Trois familles de modélisation de l'écoulement ont été identifiées. La première, qualifiée de numérique se base sur la résolution des équations de Navier-Stokes par des méthodes de CFD. Les deux autres sont qualifiées d'analytique, la première se base sur la considération de l'effet cheminée, et la deuxième sur l'écriture des pertes de charge. Cependant peu d'études ont comparé ces approches. Nous remarquons aussi que souvent la validation s'est faite par comparaison avec des essais en laboratoire, ou que les modèles n'ont été confrontés qu'à des mesures réalisées pour un seul type de solution, limitant ainsi le domaine de validité de ces modèles.

Chapitre 2 :

Protocole expérimental et exploitation des mesures

Comme présenté dans le chapitre 1, les mécanismes de transfert de chaleur dans une cavité ouverte chauffée asymétriquement restent relativement complexes, notamment la partie convective. Afin de les étudier, un dispositif expérimental a été installé et instrumenté. Celui-ci a été placé en extérieur de telle manière à réaliser des mesures dans des conditions réelles. L'échelle de l'étude est celle d'un mur devant lequel est placée une protection solaire.

Nous présentons ce dispositif expérimental, dans la première partie de ce chapitre.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous traitons les mesures expérimentales réalisées pour un certain nombre de cas. Nous nous intéressons ici tout particulièrement à l'écoulement dans la lame d'air et ainsi aux mesures faites par les anémomètres à fil chaud.

Dans un premier temps, nous réalisons une étude comparative entre les deux types de bardage pour une lame d'épaisseur de 33 mm puis de 66 mm. Puis nous présentons et analysons les mesures obtenues pour les deux autres types de protection solaires, que sont le métal déployé et le store textile. Ensuite, nous analysons l'écoulement et les vitesses d'air mesurées et en particulier l'influence du vent. Nous considérerons le cas du bardage brut-clair pour une épaisseur de lame d'air de 33 mm.

2.1 Présentation du dispositif expérimental EPLM

2.1.1 Composition du dispositif expérimental EPLM

Pour étudier les transferts prenant place dans les systèmes, un dispositif expérimental a été installé et instrumenté. Un isolant a été rapporté sur un mur existant, le tout a été recouvert de deux plaques de plâtres. Puis des linteaux ont été placés en périphérie verticale des plaques de plâtre permettant de positionner la protection voulue. L'épaisseur de la lame d'air varie avec le nombre de linteaux (33, 66 ou 99mm).

Le dispositif a été mis en place sur la façade sud d'un bâtiment du site de l'ENSAM à Talence. Il permet la mesure pour deux solutions en parallèle. Le local derrière le mur est non chauffé ; les cartes d'acquisition, générateurs et l'ordinateur y sont placés.

Dans la suite de l'étude ce complexe Extérieur – Protection solaire – Lamme d'air – Mur est nommé EPLM. Les différentes couches composant le complexe EPLM sont représentées sur la figure 2.1 et les cotes apparaissent sur la figure 2.2.

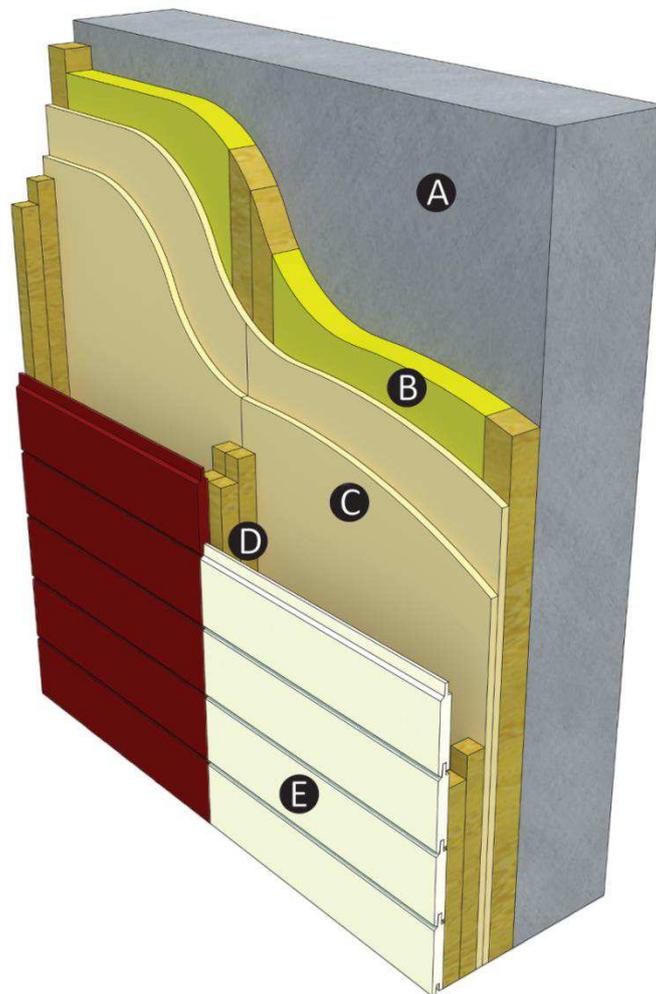


Figure 2.1 : Schéma représentant les éléments composant le complexe EPLM

La composition du complexe EPLM est la suivante (cf figures 2.1 et 2.2) :

- A. Crépis et couche béton existants de 200mm
- B. Isolant : laine de verre 50mm
- C. 2 plaques de plâtre de type BA13 de 13mm chacune et de 2500mm de hauteur

- D. lame d'air d'épaisseur 33mm, 66mm ou 99mm, ouverte en parties basses et hautes
- E. Solution de protection solaire posée sur liteaux

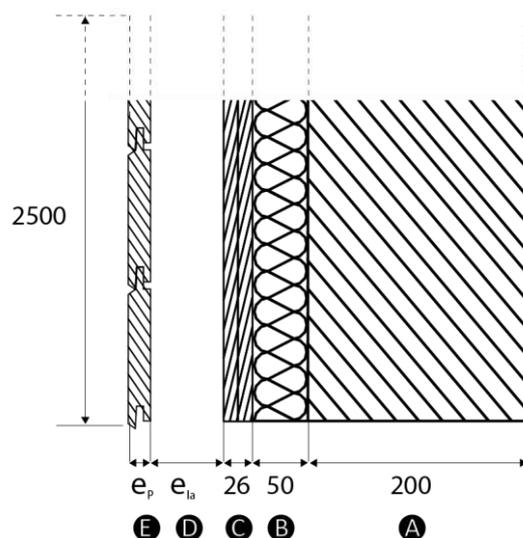


Figure 2.2 : Schéma indiquant les cotes en mm et reportant les couches composant le complexe EPLM

2.1.2 Montage du complexe EPLM

Une première série de mesures pour la même installation a été faite en 2011. Des infiltrations dans le mur ont causé une déformation des plaques de plâtre, perturbant ainsi les transferts. Pour cette raison, l'ensemble du dispositif a été déposé et réinstallé au cours du mois d'avril 2012. Une protection contre la pluie a aussi été placée au-dessus du dispositif. Celle-ci a été posée de telle manière à ne pas perturber les apports solaires.

Une nouvelle série de mesures a pu être faite pendant l'été 2012, pour les éléments considérés. Le montage est illustré par les photos 2.3 à 2.6.



Figure 2.3 : Premier panneau de BA13 posé, thermocouples placés.



Figure 2.4 : Liteaux fixés, mise en place du bardage pin brut-clair



Figure 2.5 : Les deux bardages (pin brut-clair et pin aggloméré) sont placés.

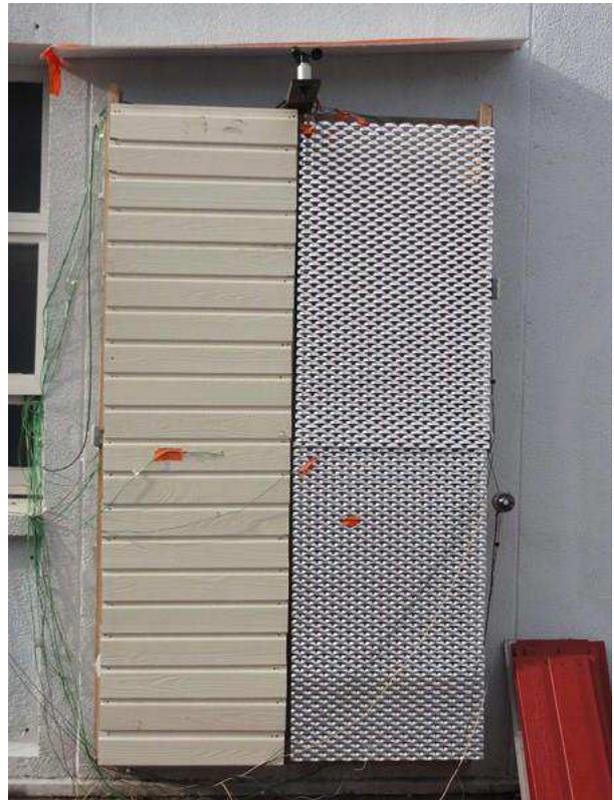


Figure 2.6 : Le métal déployé à côté du bardage pin brut-clair

2.1.3 Les solutions de protection solaire étudiées

2.1.3.1 Présentation des protections solaires

Deux types de bardage bois sont utilisés, le premier est du pin maritime couleur calcaire d'épaisseur 21 mm, le second est constitué de planches de 9mm d'épaisseur d'aggloméré bois lié par de la colle et de couleur Flamenco.

Une toile de type Soltis 92 faite de fils polyester et enduite avec du PVC, micro perforée et de couleur grise est un type de store couramment utilisé. La perforation en fait un matériau partiellement transparent et perméable. Le choix d'étudier un store comme celui-ci a été fait car son usage est classique comme protection solaire extérieure.

Une solution moins courante est du métal déployé ; c'est le résultat du cisaillement de plaques de métal par une presse, donnant l'effet de treillis métallique. Ici, c'est une plaque d'aluminium de 2 mm, avec les mailles de type IBIZA 62M1 dont la géométrie est présentée sur la figure 2.7. C'est le fait d'avoir travaillé sur plusieurs projets de construction où le métal déployé était utilisé qui a motivé l'intégration de ce type de protection solaire dans la campagne de mesures.

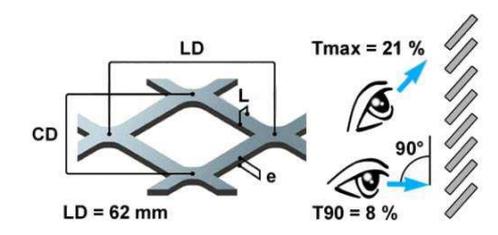


Figure 2.7 : illustration des caractéristiques géométriques du métal déployé (d'après documentation commerciale MétalDéployé)

Les documentations techniques des fabricants du store et du métal déployé sont mises en annexe 3.

2.1.3.2 Propriétés des matériaux

Pour l'isolant, les données sont celles fournies par le fabricant, et validées par des organismes indépendants (mesure de la conductivité avec certification ACERMI). Pour le béton, le BA13, le store et le métal déployé, les données associées sont issues du fascicule Matériaux des règles Th-U de la réglementation thermique 2005. Pour le store, c'est une résine polyester qui a été considérée, et pour le métal déployé, l'aluminium.

D'autres paramètres comme la conductivité et la masse volumique des deux bardages ont été mesurés en laboratoire. Le coefficient d'absorption a été estimé en utilisant deux pyranomètres : le premier mesure le flux solaire incident, et le second le flux solaire réfléchi par la surface considérée.

2.1.3.2.1 Mesure de l'émissivité

L'émissivité a été mesurée en laboratoire par mesures infrarouge en utilisant un scotch noir de référence dont on connaît l'émissivité et une feuille d'aluminium dont l'émissivité est considérée comme nulle, comme réalisé par Labat (2012). La caméra permet de mesurer le flux incident depuis le scotch, la feuille d'aluminium et le matériau étudié donnant ainsi trois équations. Sous l'hypothèse que la température de surface du scotch est considérée comme égale à celle de la surface du matériau, les inconnues sont alors la température de surface du matériau étudié, l'émissivité de ce matériau et la température de brillance de l'environnement. On a alors un système à trois équations et trois inconnues.

Nous présentons ici rapidement le protocole utilisé. Un scotch dont on connaît l'émissivité est placé sur le matériau dont on veut mesurer l'émissivité (figure 2.8). Le matériau est chauffé dans une enceinte thermique de telle manière à forcer la différence de température de surface entre le matériau et l'environnement. Le flux en infrarouge est mesuré par une caméra de type IR FLIR modèle B200 de bande passante 7,5 à 13 μm (figure 2.9). Ensuite, à partir des températures mesurées, l'émissivité du matériau peut être calculée.

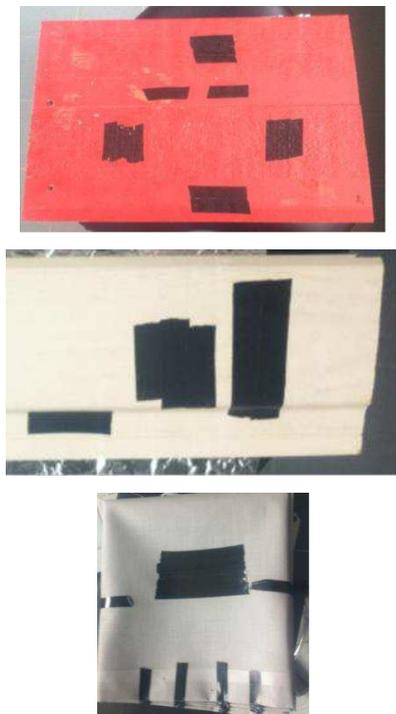


Figure 2.8 : Bardage aggro-rouge (haut), bardage brut-clair (milieu) et store (bas) avec scotch



Figure 2.9 : Caméra IR sur trépied

La figure 2.10 est une illustration de la mesure faite avec la caméra infrarouge. Nous pouvons voir les différentes températures de brillance des deux bardages ainsi que des scotchs placés dessus.



Figure 2.10 : exemple de mesure infrarouge pour les deux types de bardage.

Les mesures ont été faites pour différentes températures d'ambiance du four. Ces résultats de mesure apparaissent sur la figure 2.11 et les valeurs retenues sont reportées dans le tableau 2.1. Les résultats sont cohérents avec les couleurs et aspects des matériaux : ce sont des matériaux mats, leurs émissivités sont alors élevées. Pour chaque matériau, il est possible de vérifier la faible variation du coefficient d'émissivité en fonction de la température sur la plage de température de 40 à 80°C.

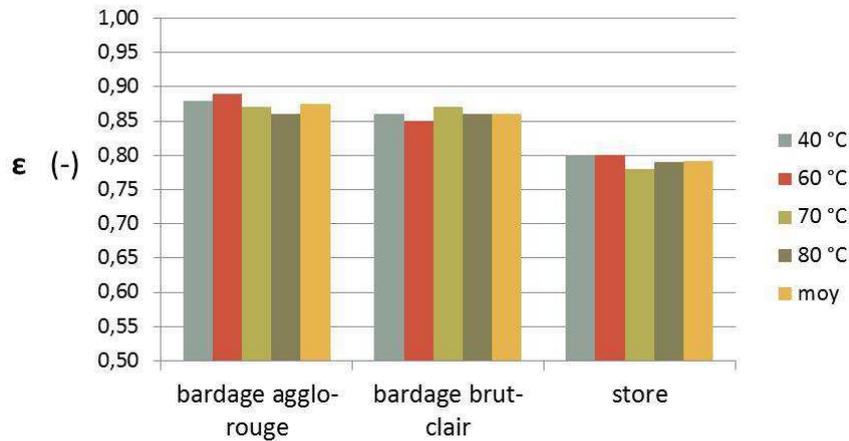


Figure 2.11 : résultats des mesures effectuées d'émissivité de trois protections solaires en fonction de la température d'ambiance du four et valeur moyenne retenue

2.1.3.2.2 Tableau récapitulatif des données des matériaux

Les propriétés des matériaux utilisés dans les modèles sont présentées dans le tableau 2.1.

Matériau	λ W/m ² .K	Cp J/kg.K	ρ kg/m ³	α_{clo}	ϵ	τ	épaisseur mm	R m ² .K/W
Laine de verre	0,032	1030	19,4	-	-	0	50	1,56
Béton	1	1000	2200	-	-	0	100	0,1
Plaque de plâtre BA13	0,25	1000	825	0,9	0,9	0	13	0,052
Bardage 1 (pin aggro-rouge)	0,289	1800	1100	0,7	0,88	0	11	0,038
Bardage 2 (pin brut-clair)	0,201	1300	560	0,4	0,86	0	20	0,1
Store	0,19	1700	1400	0,7	0,79	0,09	3	0,015
Métal déployé	230	880	2700	0,1	0,3	Variable	3	1*10 ⁻⁵

Tableau 2.1 : Propriétés thermiques des matériaux

2.1.3.2.3 Différence entre les protections solaires

Il faut remarquer que les protections solaires ont des propriétés différentes. D'abord, les deux bardages sont opaques et non perméables alors que le store et le métal déployé ont une transparence et perméabilité non nulle.

Les échanges entre la lame d'air et l'environnement extérieur sont d'autant plus grand que la protection solaire absorbe le flux solaire incident en CLO et que la résistance thermique de la lame d'air est faible. En ce sens, les deux bardages sont différents. En effet, le bardage aggro-rouge a un coefficient d'absorption plus élevé que le bardage brut-clair et sa résistance thermique est plus faible. Il s'agira alors d'étudier laquelle de ces deux propriétés a un impact le plus fort sur le comportement du système.

2.2 Présentation de l'instrumentation réalisée

2.2.1 Les paramètres à mesurer

De manière à étudier les transferts dans l'EPLM, les conditions extérieures doivent être monitorées ainsi que les transferts dans l'EPLM. Il a ainsi été décidé de mesurer les paramètres suivants :

Pour les conditions extérieures :

- Eclairage extérieur, c'est le flux radiatif incident correspondant au rayonnement en courte longueur d'onde
- Température d'air extérieur
- Vitesse de vent proche

Pour les transferts dans l'EPLM :

- Vitesse de l'écoulement vertical dans la lame d'air
- Température des surfaces intérieures et extérieures des protections solaires
- Température dans la lame d'air
- Température aux interfaces entre les couches rapportées du mur.

Toutes ces mesures de températures se font à trois hauteurs distinctes : partie basse, hauteur médiane, et partie haute.

2.2.2 Emplacement des capteurs

La figure 2.10 présente le schéma en coupe de l'EPLM, avec l'emplacement des différents capteurs.

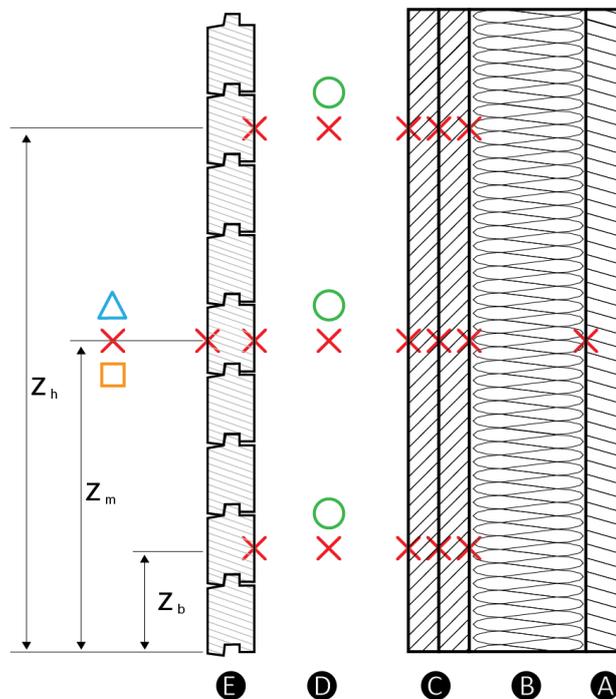


Figure 2.12 : Schéma de l'emplacement des capteurs dans l'EPLM. X Thermocouples K, O anémomètres à fil chaud □ pyranomètre, △ anémomètre à coupelles

Des thermocouples sont placés à chaque interface entre les couches du complexe EPLM. Ils sont situés entre deux couches de matériaux opaques ou à l'interface entre un matériau et l'air.

La température extérieure est celle donnée par la station météo située sur le toit d'un bâtiment distant d'une centaine de mètres.

L'écoulement fait intervenir des transferts de chaleur verticaux. Afin d'analyser la variation verticale, les mesures de température se font sur trois hauteurs. Une hauteur basse, z_B , une hauteur médiane z_M , une hauteur haute z_H , respectivement situées à 15 cm, 125 cm, et 235 cm au-dessus de l'entrée d'air de l'EPLM.

Les mesures de l'écoulement d'air dans la lame d'air se font avec les anémomètres à coupelle. Deux sont toujours placés à la hauteur z_M des deux protections solaires placées et un autre a été déplacé au cours des mesures. Les mesures de flux solaire incident, et de vitesse d'air extérieur se font à proximité du complexe EPLM.

2.2.3 Les capteurs et matériel d'acquisition utilisés

2.2.3.1 Pyranomètre

La mesure de l'éclairement solaire se fait par une sonde de rayonnement global ALMEMO de type FLA613GS. La plage de mesure est de 0 à 1200 W/m² et la sensibilité spectrale va de 0,4 μ m à 1,1 μ m. L'erreur est inférieure à 10%. La sonde est alimentée par un générateur basse tension et renvoie une tension entre 0 et 2 V.

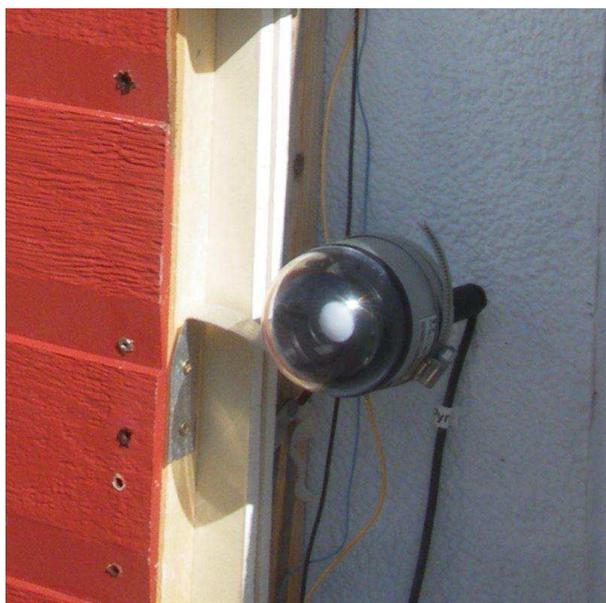


Figure 2.13 : Pyranomètre installé sur le complexe

Sur la figure 2.11, on peut voir que le pyranomètre est orienté de la même façon que l'EPLM de telle façon que l'éclairement mesuré corresponde à l'éclairement incident sur l'EPLM. Il faut remarquer que l'éclairement mesuré comprend une part de rayonnement réfléchi par les surfaces environnantes.

2.2.3.2 Anémomètre à coupelle

La vitesse d'air à l'extérieur du complexe est mesurée à l'aide d'un anémomètre à coupelle AHLBORN de type FVA615. Sa plage de mesure va de 0 à 50 m/s avec une précision de l'ordre de 0,5 m/s. Alimenté par un générateur basse tension, la sonde renvoie une tension.



Figure 2.14 : Anémomètre à coupelle placé au-dessus du complexe EPLM

La sonde est positionnée au-dessus du complexe à un mètre du mur sur lequel s'appuie le complexe, comme on peut le voir sur la figure 2.12.

2.2.3.3 Anémomètre à fil chaud

La vitesse d'écoulement de l'air dans la lame d'air derrière la protection solaire est mesurée par des anémomètres à fil chaud Delta Ohm de type HD2903TO1. La sonde est ici solidaire du boîtier. Elle a un diamètre de 12 mm pour une longueur de 150mm. Plusieurs plages de mesure sont possibles. Ici, c'est la plage entre 0 et 2 m/s qui a été choisie. L'erreur maximale de la mesure annoncée est de 3%.

Les sondes sont alimentées par un générateur basse tension et renvoient un courant entre 4 et 20 mA.

Sur la partie droite de la figure 2.13, deux anémomètres sont placés dans la lame d'air derrière le métal déployé, pour une épaisseur de lame d'air de 99 mm. Le premier est à la hauteur z_m , et le deuxième à hauteur z_h .

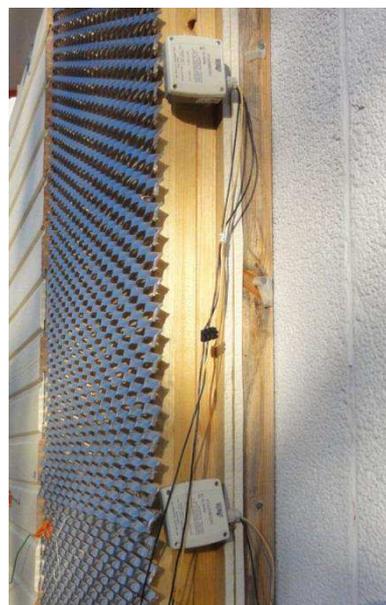


Figure 2.15 : Anémomètre à fil chaud et les emplacements aux hauteurs moyenne et haute derrière le métal déployé pour une lame d'air de 99mm

2.2.3.4 Thermocouples

La mesure de température se fait avec des thermocouples de type K. Les thermocouples situés entre deux couches sont positionnés à l'aide de scotch. Les autres sont à des interfaces entre une couche solide et l'air, ils sont recouverts d'un scotch à haute conductivité thermique, haut coefficient de réflexion et faible émissivité de telle manière à limiter les transferts radiatifs, et à ce qu'ils soient à l'équilibre thermique avec la surface en contact. Le placement d'un tel thermocouple est visible sur la figure 2.14. Enfin, ceux au milieu de la lame d'air sont positionnés à l'aide d'un support métallique, et ils peuvent alors être mieux placés au milieu de la lame d'air, comme on peut voir sur la partie haute de la figure 2.14.



Figure 2.16 : Deux thermocouples placés. Un sur la plaque de BA13 et l'autre dans la lame d'air

2.2.3.5 Générateur basse tension

Deux générateurs basse tension sont utilisés pour alimenter les différents capteurs. Ils sont visibles sur la figure 2.17.



Figure 2.17 : Les deux générateurs basse tension utilisés

2.2.3.6 Centrale d'acquisition

L'acquisition des thermocouples se fait par un module de mesure spécifique NI 9213 à 16 voies, comptant une soudure froide intégrée.

L'acquisition des sondes renvoyant un courant ou une tension se fait avec un module d'entrée analogique de type NI 9201 pour tension entre -10 V et +10 V.

Ces deux modules d'acquisition sont placés sur un châssis CompactDAQ cDAQ-9174 connecté à un ordinateur par câble USB, visibles sur la figure 2.18.

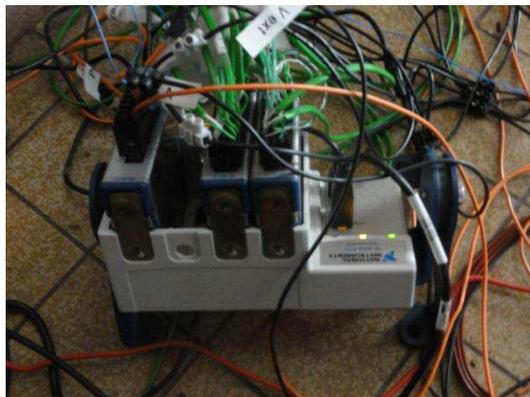


Figure 2.18 : Centrale d'acquisition, composée de deux cartes pour thermocouples et une pour tension

2.2.3.7 Ordinateur et programme Labview

La transformation des données analogiques au format numérique et l'enregistrement des données se font par un programme réalisé avec Labview. Celui-ci permet la visualisation de toutes les données mesurées en temps réel et intègre une boucle d'enregistrement pour un pas à déterminer.

2.3 Protocole expérimental

2.3.1 Chronologie des mesures

Des premières mesures ont été faites pendant l'été 2011. Constatant des limitations notamment dues à la faible confiance dans la mesure de l'écoulement dans les lames d'air, et le fait que la pluie avait déformé les plaques de plâtre, le système a été démonté et remonté avec des matériaux neufs.

En 2012, après une phase de vérification des capteurs, les mesures se sont faites sur des périodes ensoleillées d'août 2012 à septembre 2012.

Les liteaux permettant de fixer les protections solaires ont permis de définir l'épaisseur de lame d'air. Ainsi pour un liteau, la lame d'air est de 33 mm, pour deux, 66 mm et pour trois, approximativement 100 mm.

Les mesures ont été réalisées pour les types de protections solaires étudiées et pour les trois épaisseurs de lame possibles, avec l'objectif d'avoir au moins une journée ensoleillée pour chacune de ces configurations.

Le pas de temps d'acquisition est fixé à une minute. Les fichiers résultants présentent les mesures non traitées.

2.3.2 Sélection et traitement des données mesurées

Un travail de traitement des données a été réalisé. D'abord, l'identification des journées ensoleillées, limitant ainsi la quantité de données, le tableau 2.2 indique les dates retenues pour chaque configuration :

n° séquence	date début		date fin		e _{lame} (mm)	Emplacement solaire		Protection	Emplacement anémomètres		
	jour	heure	jour	heure		PS 1	PS 2		An 1	An 2	An 3
1	30/07	00:00	01/08	00:00	33	brut-clair			m1	h1	b1
2	01/07	00:00	03/07	00:00	33	brut-clair	Agglo-rouge		m1	h1	m2
3	21/08	00:00	23/08	00:00	33	brut-clair	Store		m1	m2	b1
4	01/09	00:00	03/09	00:00	66	brut-clair	Agglo-rouge		m1	m2	b1
5	06/09	00:00	08/09	00:00	66	brut-clair	Store		m1	m2	b1
6	11/09	00:00	14/09	16:04	66	brut-clair	Métal déployé		m1	m2	h2
7	15/09	00:00	17/09	00:00	100	brut-clair	Store		m1	m2	h2
8	17/09	08:58	19/09	16:25	100	brut-clair	Agglo-rouge		m1	m2	h2
9	20/09	00:00	21/09	23:59	100	brut-clair	Métal déployé		m1	m2	h2

Tableau 2.2 : Séquences de mesures choisies et leurs détails

Une moyenne mobile a été appliquée aux données mesurées de manière à limiter le bruit de mesure. Pour les mesures de température, cette moyenne mobile se fait sur 5 minutes. Pour l'éclairement, et les mesures de vitesse de vent, plus sensibles à des variations rapides qui ne sont pas l'objet de l'étude, une moyenne mobile plus longue de 19 minutes a été appliquée.

2.4 Présentation des mesures

Nous présentons ici les mesures de la première journée du 01/09/2012 correspondant à la séquence n°4 obtenues après traitement (cf tableau 2.2). Les deux protections solaires en place étaient alors le bardage pin brut-clair, et le bardage pin aggloméré-rouge avec une lame d'air de 66 mm. La discussion des données mesurées est faite plus en détail par la suite.

2.4.1 Eclairement mesuré

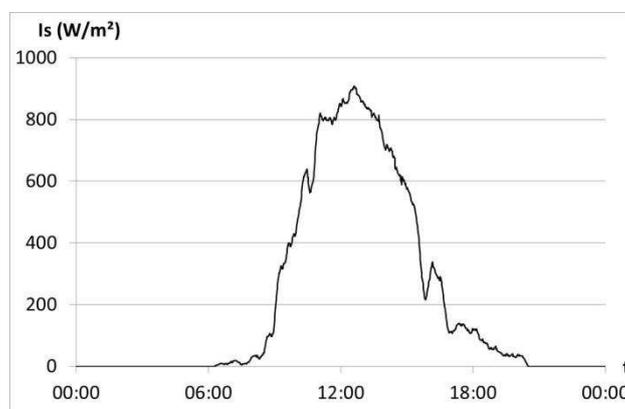


Figure 2.19 : Flux radiatif en grande longueur d'onde incident la journée du 01/09/2012

La figure 2.19 montre l'évolution de la densité de flux solaire incident mesuré pour une journée ensoleillée. La densité de flux incident maximal est de l'ordre de 900 W/m². La variation brutale à

17h00 s'explique par un bâtiment lointain qui porte de l'ombre sur le mur à ce moment de la journée.

2.4.2 Vitesses d'écoulement dans les lames d'air

Deux anémomètres sont placés dans la lame d'air derrière le bardage brut-clair, le premier à mi-hauteur (bleu) mesure la vitesse d'écoulement à hauteur médiane v_{L_m} et le second dans la partie basse (rouge) mesure v_{L_b} . Le troisième anémomètre est situé derrière le bardage pin aggloméré-rouge (vert) à hauteur médiane. Les vitesses mesurées le 01/09/2012 apparaissent sur la figure 2.20.

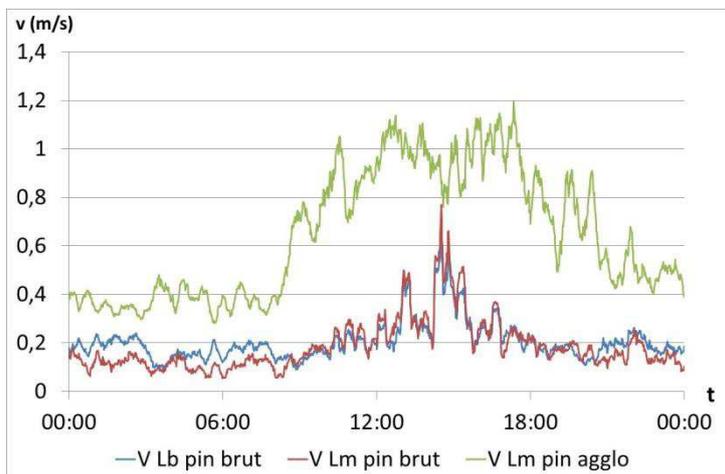


Figure 2.20 : Vitesses mesurées dans les lames d'air la journée du 01/09/2012. En bleu, la vitesse à hauteur z_b , en rouge, à hauteur z_m , pour le cas du bardage brut-clair. En vert, à la hauteur z_m pour le bardage aggloméré-rouge.

Nous remarquons que les vitesses d'écoulement de l'air données par les deux anémomètres situés derrière le bardage brut-clair, la première en partie basse v_{L_b} et la deuxième en partie médiane v_{L_m} , coïncident fortement.

Les variations de vitesse à courte échelle de temps sont relativement fortes. Mais des tendances se dégagent, notamment une augmentation de la vitesse quand le soleil frappe le bardage et une décélération la nuit.

Ensuite, nous remarquons que la vitesse d'écoulement de l'air mesurée derrière le bardage aggloméré-rouge (en vert) est largement supérieure à celle mesurée derrière le bardage brut-clair (en bleu et rouge).

2.4.3 Températures d'air dans les lames d'air

Les températures sont mesurées au milieu des Lames d'air aux trois hauteurs. La figure 2.21 présente les évolutions des trois températures d'air T_{L_b} , à la hauteur basse, T_{L_m} , à hauteur médiane et T_{L_z} à hauteur haute, mesurées dans la Lame d'air derrière le bardage brut-clair, ainsi que la température extérieure. Sur la figure 2.20, ce sont les mêmes températures dans le cas du bardage aggloméré-rouge.

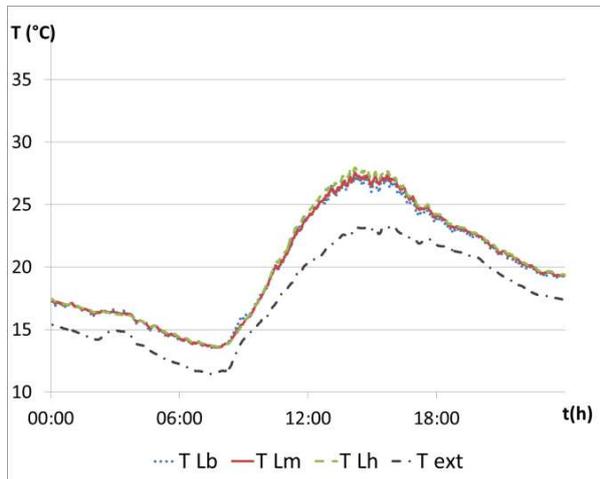


Figure 2.21 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage brut-clair, journée du 01/09/2012, séquence n°1

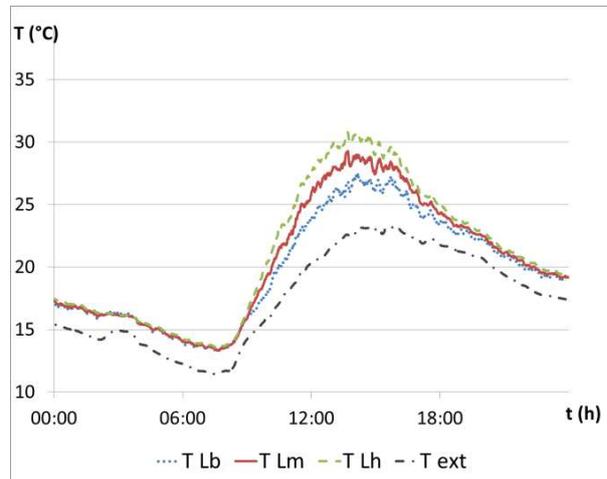


Figure 2.22 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage aggro-rouge, journée du 01/09/2012, séquence n°1

Tirets-points noirs : air extérieur. pointillés bleus : en partie basse, en ligne continue rouge : à hauteur médiane, en tirets verts : en partie haute de la lame d'air.

Légende qui s'applique à tous les graphes de températures aux trois hauteurs dans la lame d'air

Pour les deux protections solaires, les températures d'air dans la lame d'air sont toujours plus élevées que la température d'air extérieur.

La nuit, les températures dans la lame d'air sont sensiblement les mêmes. La journée, un gradient vertical apparaît. Ainsi la température en partie haute est la plus élevée, et c'est la température en partie basse la plus froide.

Nous remarquons que le gradient vertical de température est plus élevé pour le cas du bardage aggro-rouge (figure 2.22) que pour le cas du bardage brut-clair (figure 2.21). Nous expliquons pourquoi par la suite.

Synthèse du protocole expérimental

Le banc d'essai permettant l'étude des transferts de chaleur à l'échelle d'une paroi devant laquelle est placée une protection solaire a été mis en place. Les deux plaques de plâtre rapportées sur le mur existant permettent notamment de mieux étudier les transferts de chaleur sur la partie extérieure du mur en plaçant des thermocouples de part et d'autre de chaque plaque.

Le banc d'essai permet de placer deux protections solaires distinctes en parallèle. Ainsi, il est possible d'analyser de manière comparative le comportement de ces deux solutions de protection solaires. Le bardage brut-clair a été laissé pendant toute la période de mesures sur la partie gauche du mur de telle manière à avoir un cas de référence.

Les mesures ont été traitées et des séquences de deux jours pour chaque protection solaire étudiée et épaisseurs de lame d'air possibles ont été identifiées.

L'exploitation des données de mesures est faite dans la suite de ce chapitre. L'objectif est notamment l'étude de l'écoulement dans la lame d'air induit par les apports solaires.

Ces mesures permettront aussi de vérifier la validité du modèle développé dans ce travail.

2.5 Comparatif entre deux solutions de bardage bois

2.5.1 Méthodologie de comparaison

Nous voulons ici comparer le comportement du système EPLM pour les deux types de bardage étudiés, et pour deux épaisseurs de lame d'air (33 mm et 66 mm).

Ainsi, nous considérons les séquences n°2 et n°4 du tableau 2.2 pour les deux bardages bois. Le premier est composé de pin brut et a une épaisseur de 20 mm et une couleur calcaire. Le deuxième, moins épais (11 mm) est couleur Flamenco et en pin aggloméré. Ils ont des propriétés thermiques différentes présentées dans le tableau 2.1.

Les deux bardages étant installés parallèlement, il est possible d'analyser les données mesurées dans la lame d'air de manière comparative.

Nous présentons en détail les données mesurées pour la lame d'air de 33 mm. En effet, cette épaisseur de lame d'air correspond aux règles de mises en œuvre d'un bardage définies par le document technique unifié DTU 41.2 « revêtements extérieurs en bois ». Puis nous présentons plus rapidement certaines mesures pour une lame d'air d'épaisseur 66 mm.

2.5.2 Lame d'air de 33 mm

Nous considérons dans ce premier cas la séquence n°2 (cf tableau 2.2). La densité de flux solaire incident est illustrée sur la figure 2.23, et la vitesse de vent extérieur sur la figure 2.24.

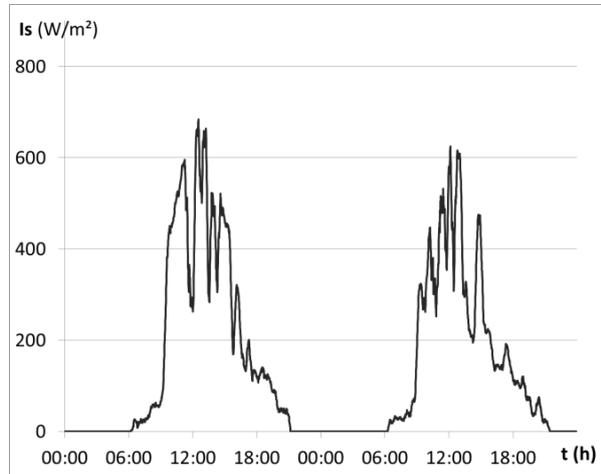


Figure 2.23 : Densité de flux solaire incident, séquence n°2

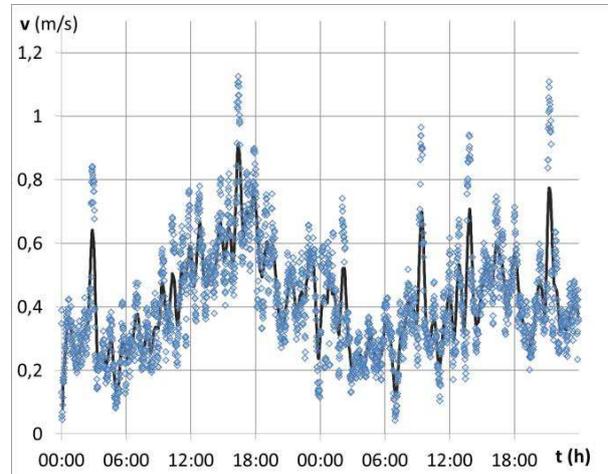


Figure 2.24 : Vitesse de vent extérieur pour la séquence n°2. Les points, les mesures à chaque pas de temps, en trait plein, la moyenne mobile de ces mesures.

Nous présentons ci-après les résultats pour les cas du bardage en pin aggloméré, puis du bardage pin brut.

2.5.2.1 Bardage pin aggloméré

Pour les 2 jours de la séquence n°2, et pour le bardage aggro-rouge, les températures mesurées aux trois hauteurs de la lame d'air sont tracées sur la figure 2.25, à l'interface entre le mur et la lame

d'air sur la figure 2.27 et à l'interface entre la protection solaire et la lame d'air sur la figure 2.28. La vitesse d'air mesurée dans la lame d'air est tracée sur la figure 2.26.

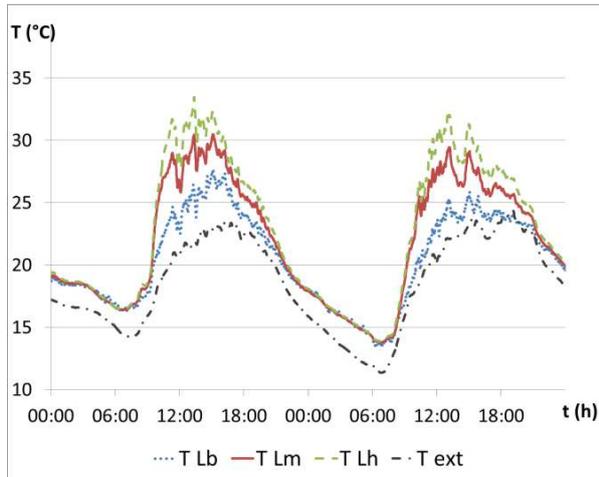


Figure 2.25 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2

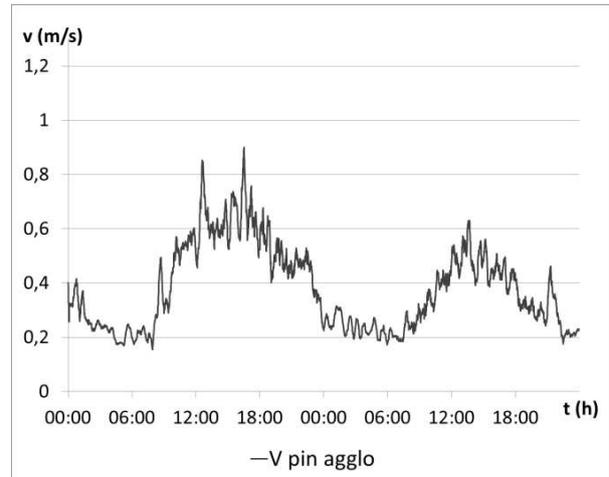


Figure 2.26 : Vitesse d'écoulement mesurée, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2

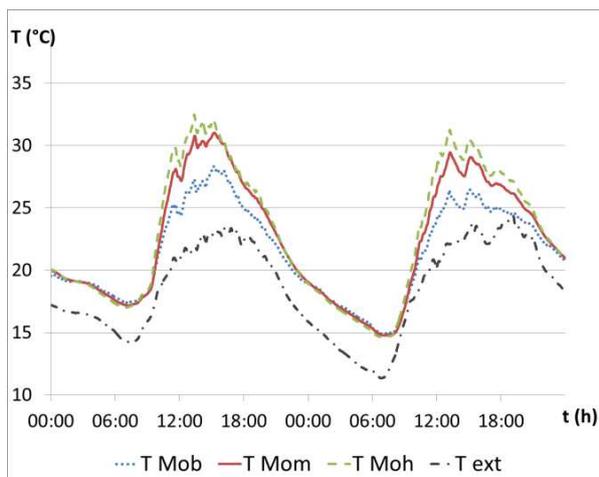


Figure 2.27 : Températures à l'interface entre le mur et la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2

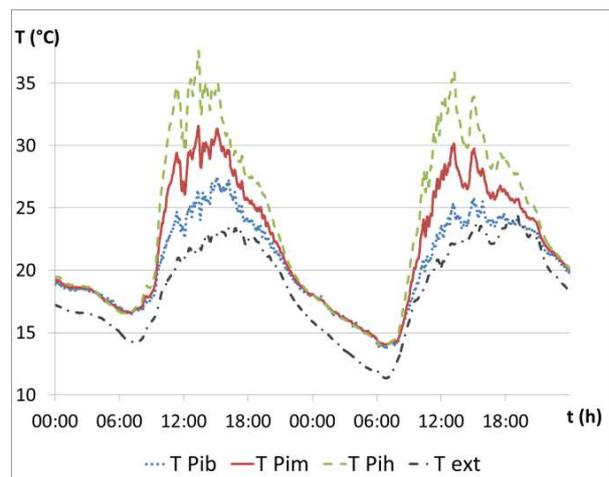


Figure 2.28 : Températures à l'interface entre la protection solaire et la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2

Le gradient vertical de la température se retrouve pour les trois coupes. C'est au niveau de la surface entre la protection solaire et la lame d'air que les températures sont les plus élevées et que le gradient y est le plus fort. A l'opposé, au niveau de la surface entre le mur et la lame d'air, le gradient vertical y est le plus faible. Pour les trois hauteurs, la température de l'air de la lame est comprise entre les deux températures des surfaces délimitant la lame d'air. Le gradient vertical coïncide avec la vitesse d'écoulement mesurée.

On retrouve bien les deux directions du transfert de chaleur. Le gradient vertical traduit l'évacuation de chaleur vers le haut. Et horizontalement, il y a bien transfert de chaleur, en présence d'apports solaire, celui-ci est clairement de l'extérieur vers l'intérieur.

La nuit, les trois gradients verticaux sont nuls. En effet, toutes les températures mesurées sont sensiblement les mêmes. La température d'air extérieure est inférieure à la température mesurée dans la lame d'air. Mais il faut remarquer que la température d'air extérieur mesurée est sans doute sous-estimée. En effet, la température extérieure est donnée par une station météorologique distante d'une centaine de mètres et à une altitude de 10 m, elle est aussi plus exposée au vent et est moins aux échanges radiatifs avec des surfaces ayant chauffé la journée.

Il apparaît que la lame d'air est alors très probablement à l'équilibre avec l'air extérieur.

La vitesse d'écoulement mesurée la nuit n'est pas nulle, mais le gradient vertical de la température d'air dans la lame d'air l'est. Ainsi, il y a un renouvellement d'air, mais le transfert d'énergie associé est très faible. Ce point est abordé en détail par la suite dans le paragraphe 2.8.1.4.

2.5.2.2 Bardage pin brut

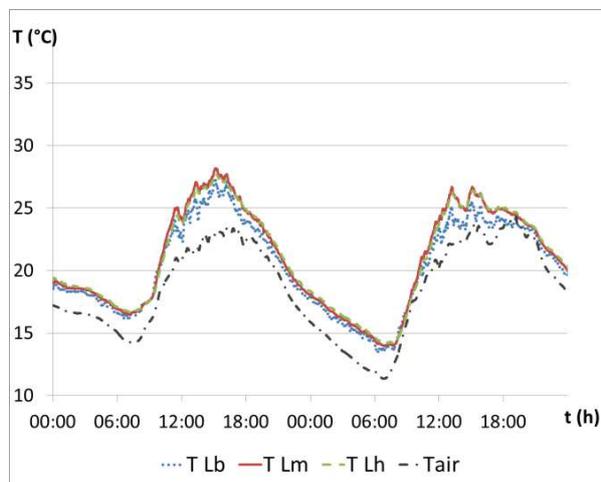


Figure 2.29 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage brut-clair, séquence n°2

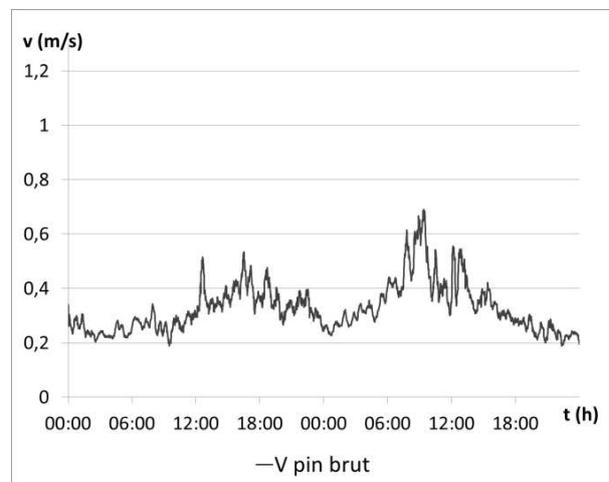


Figure 2.30 : Vitesse d'écoulement mesurée, cas du bardage brut-clair, séquence n°2

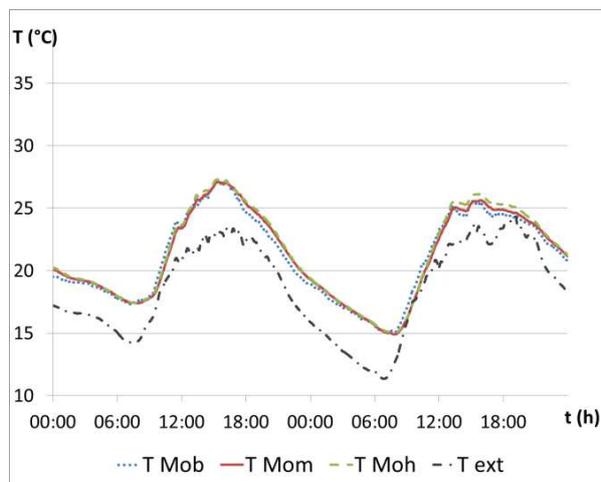


Figure 2.31 : Températures à l'interface entre le mur et la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage brut-clair, séquence n°2

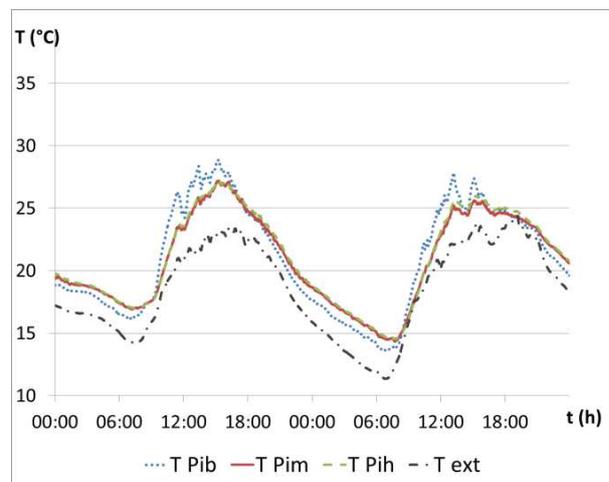


Figure 2.32 : Températures à l'interface entre la protection solaire et la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage brut-clair, séquence n°2

Pour les 2 jours de la séquence n°2 (cf tableau 2.2), et pour le bardage brut-clair, les températures mesurées aux trois hauteurs sont tracées dans la lame d'air sur la figure 2.29, à l'interface entre le mur et la lame d'air sur la figure 2.31 et à l'interface entre la protection solaire et la lame d'air sur la figure 2.32. La vitesse d'air mesurée dans la lame d'air est tracée sur la figure 2.30.

Le gradient vertical dans la lame d'air est visible sur la figure 2.29, alors qu'il ne l'est pas pour les figures 2.31 et 2.32, c'est-à-dire pour les températures des surfaces délimitant la lame d'air. La vitesse d'écoulement mesurée est aussi plus faible que pour le bardage aggro-rouge, et on remarque bien des vitesses d'écoulement plus élevées la journée que la nuit. L'écoulement est associé au tirage thermique dû à l'apport de chaleur sous forme radiative. Le fait que la vitesse d'écoulement soit plus faible pour le bardage pin brut que pour le bardage aggro-rouge traduit un moins grand apport de chaleur dans la lame d'air.

La température de surface interne de la protection solaire en partie basse $T_{P_{i,b}}$ visible sur la figure 2.32 (bleu) semble aberrante. En effet, la nuit alors que toutes les autres températures sont sensiblement les mêmes, celle-ci diffère. De la même manière, les variations diurnes sont différentes des autres températures mesurées sur la face interne de la protection solaire $T_{P_{i,m}}$ et $T_{P_{i,h}}$. Ces variations sont à rapprocher de celles de la température d'air de la lame d'air en partie basse T_{L_b} visible sur la figure 2.29. Il apparaît alors très probable que le thermocouple soit décollé, et que la température donnée corresponde à celle de la lame d'air en partie basse.

2.5.2.3 Efficacité comparée

Une protection solaire permet de limiter le flux solaire incident, dans l'objectif de minimiser les apports de chaleur. Afin de comparer la performance de ces deux solutions, l'analyse du flux conductif dans le plâtre situé derrière la lame d'air serait pertinente. Dans le protocole expérimental proposé la mesure du flux conduit dans le mur n'est pas intégrée. Cependant les températures de part et d'autres de la 2^{ème} couche de plâtre sont mesurées leur différence est un bon indicateur ; sous l'approximation du régime permanent, elle serait directement proportionnelle à la densité de flux conductif. Dans la suite de ces travaux, nous désignons alors par gradient thermique dans le plâtre la différence de température de part et d'autres de la deuxième couche de plâtre. Ici dans le cas des deux bardages bois, les gradients thermiques dans le mur sont tracés sur la figure 2.33.

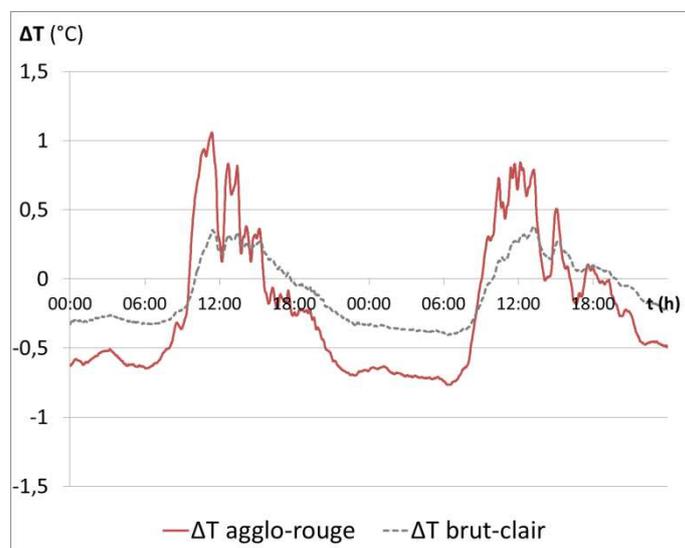


Figure 2.33 : Evolution du gradient thermique horizontal (°C) dans la 2ème couche de plâtre de l'ELPM pendant la séquence n°2. Trait plein, cas du bardage aggro-rouge, en tiret, cas du bardage brut-clair.

Sur la figure 2.33, nous pouvons voir que les gradients horizontaux sont positifs pendant la période d'apports solaires et négatives la nuit. Le gradient thermique horizontal derrière le bardage aggloméré oscille entre $-0,6$ et 1 °C alors qu'il est plus limité derrière le bardage brut-clair, variant entre $-0,3$ et $0,4$ W/m².K. De plus, on note des variations rapides derrière le bardage aggloméré que l'on ne retrouve pas pour le cas du bardage brut-clair.

Cette alternance du signe des gradients thermiques horizontaux dans le plâtre selon les phases diurne et nocturne correspond à une charge en chaleur du mur lorsqu'il y a des apports solaires, puis une décharge de cette chaleur accumulée pendant la nuit.

Le bardage aggloméré, absorbe plus de chaleur du rayonnement incident et ensuite conduit mieux cette chaleur (sa résistance thermique est 4 fois inférieure au bardage brut-clair). La chaleur fournie à la lame d'air derrière le bardage aggloméré est donc plus grande que celle fournie à la lame d'air derrière le bardage brut-clair. Comme noté et visible sur les figures 2.25 et 2.29, les températures d'air dans la lame d'air en partie médiane T_{L_m} et en partie haute T_{L_h} derrière le bardage aggloméré sont supérieures aux mêmes températures derrière le bardage brut-clair, ce qui confirme bien que la chaleur fournie à la lame d'air derrière le bardage aggloméré est plus grande que celle fournie à la lame d'air derrière le bardage brut-clair.

De plus la vitesse mesurée est aussi supérieure pour l'écoulement prenant place derrière le bardage aggloméré. Il est alors normal que la densité de flux conductif que l'on retrouve dans le mur subisse de plus grandes variations dans le cas du bardage pin aggloméré.

2.5.3 Lamé d'air de 66 mm

La séquence n°4 correspond à la mesure pour les deux bardages bois placés devant une lame d'air de 66 mm. La densité de flux solaire incident pendant les deux jours est tracée sur la figure 2.34 et la vitesse de vent extérieur, sur la figure 2.35.

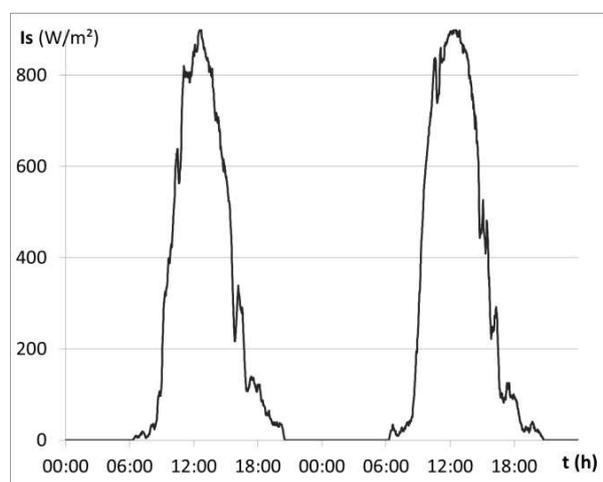


Figure 2.34 : Densité de flux solaire incident pour la séquence n°4

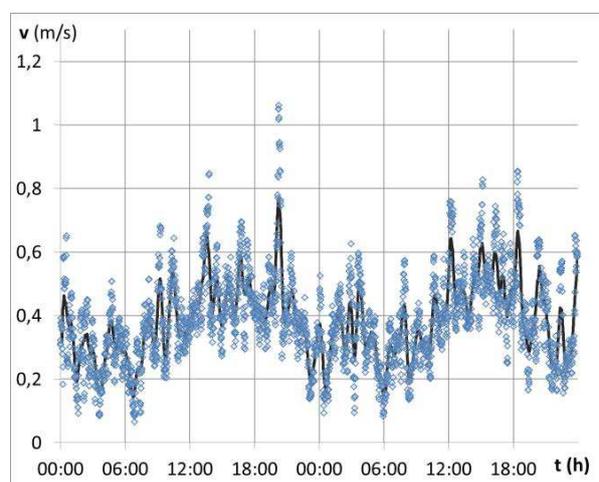


Figure 2.35 : Vitesse de vent extérieur pour la séquence n°4. Les points, les mesures à chaque pas de temps, en trait plein, la moyenne mobile de ces mesures.

Sur la figure 2.36, apparaît la vitesse de l'écoulement vertical dans la lame d'air mesurée derrière les deux types de bardage.

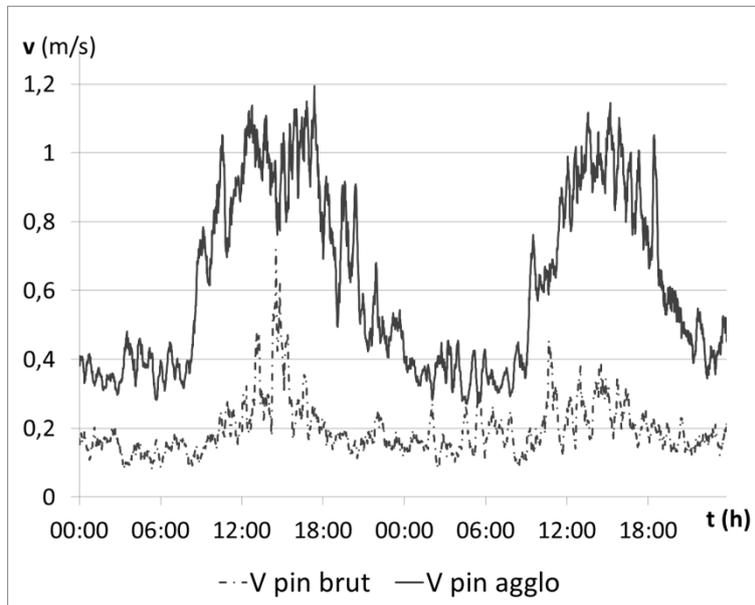


Figure 2.36 : Vitesses mesurées dans la lame d'air derrière les bardages pin brut (tirets), et pin aggloméré (trait plein) pour la séquence n°4

Les températures d'air dans les deux lames d'air aux trois hauteurs T_{L_b} , T_{L_m} et T_{L_h} , sont tracées sur les figures 2.37 et 2.38, respectivement pour le cas du bardage brut-clair, et pour le cas du bardage agglom-rouge.

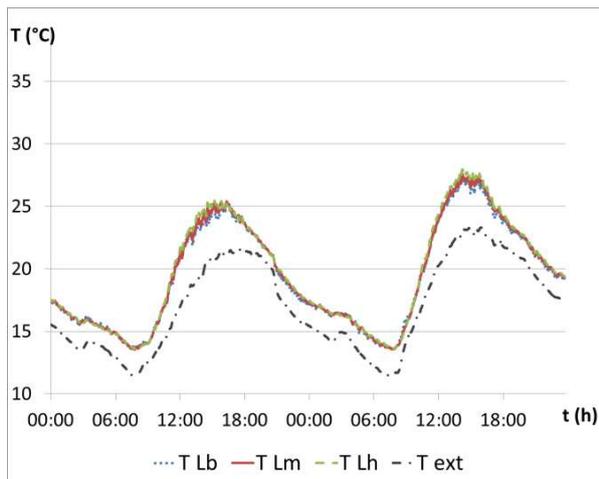


Figure 2.37 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage brut-clair, séquence n°4

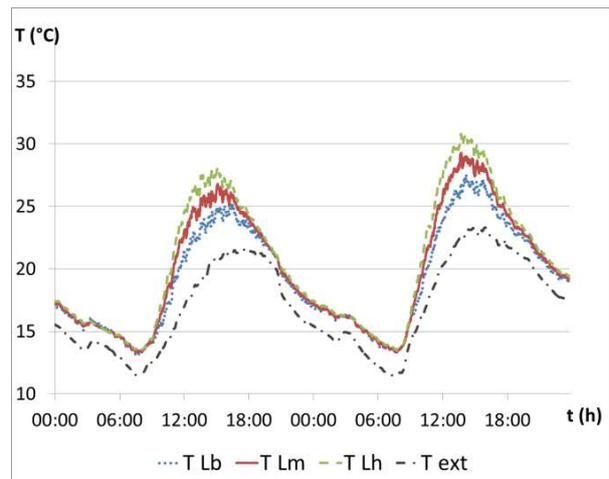


Figure 2.38 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air aux trois hauteurs, cas du bardage agglom-rouge, séquence n°4

Nous pouvons voir sur la figure 2.36 que la vitesse d'écoulement maximale derrière le bardage agglom-rouge est fortement supérieure à celle du pin brut, les vitesses maximales sont de 1 m/s pour la première et de 0,5 m/s pour la deuxième. La nuit, les vitesses d'écoulement sont relativement constantes, égales à 0,35 m/s pour le cas du bardage agglom-rouge et 0,15 m/s pour le cas du bardage pin brut.

Visible sur la figure 2.38, le gradient vertical de la température d'air est très net dans la lame d'air derrière le bardage agglom-rouge. A l'opposé, derrière le bardage pin brut le gradient vertical de température d'air est faible (figure 2.37). Nous retrouvons bien la corrélation entre le gradient vertical de température d'air et la vitesse d'écoulement : les variations du gradient thermique coïncident fortement avec celles de la vitesse d'écoulement.

Sur la figure 2.36, pour la vitesse d'écoulement derrière le bardage brut-clair, la différence entre la vitesse minimale, correspondant à celle mesurée la nuit, et la vitesse maximale atteinte le jour, est relativement faible. Ainsi pour une journée très fortement ensoleillée, la part de l'écoulement prenant place derrière le bardage pin brut par effet cheminée est difficilement identifiable.

Les gradients thermiques horizontaux dans la 2^{ème} couche de plâtre de l'EPLM sont calculés à partir de la mesure des températures, et sont tracés sur la figure 2.39.

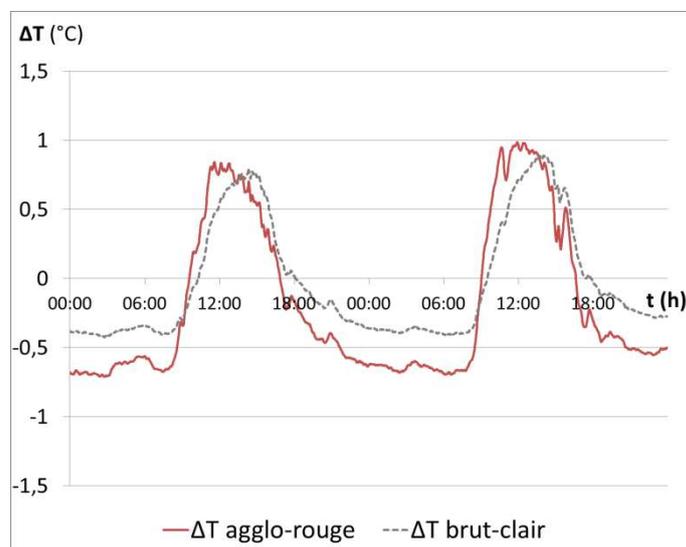


Figure 2.39 : Evolution de du gradient thermique horizontal (°C) dans la 2^{ème} couche de plâtre de l'EPLM pendant la séquence n°4. Trait plein, cas du bardage aggro-rouge, en tiret, cas du bardage brut-clair.

Les gradients thermiques horizontaux dans la 2^{ème} couche de plâtre du complexe EPLM visibles sur la figure 2.39 sont positifs pendant la période ensoleillée, et négatifs la nuit. Les valeurs maximales des deux cas sont sensiblement les mêmes, proches de 1°C. La nuit la densité de flux conductif du cas du bardage aggro-rouge est nettement inférieure à celle du cas du bardage pin brut, -0,7 °C et -0,4 °C respectivement. Cette différence traduit une plus grande perte de chaleur qui doit être liée aux plus grandes vitesses d'écoulement mesurées dans la lame d'air, visibles sur la figure 2.34.

Nous avons expliqué pour la configuration avec lame d'air de 33 mm la différence de comportement entre les deux bardages dans le paragraphe 2.5.2.3. Le bardage aggro-rouge absorbe et conduit plus de chaleur, qu'il fournit alors à la lame d'air, que le bardage brut-clair. Cette différence de chaleur se traduit par un mouvement de convection naturelle dans la lame d'air derrière le bardage pin aggloméré alors plus grand que pour le bardage brut-clair. C'est pourquoi la vitesse d'écoulement vertical mesurée derrière le bardage pin aggloméré est plus grande que celle mesurée derrière le bardage pin brut. Cette vitesse élevée permet une bonne évacuation de la chaleur donnée à la lame d'air, et favorise aussi les échanges convectifs dans la lame d'air.

Le comportement des deux bardages bois et des lames d'air associés sont ainsi bien différents. Mais la résultante, qui est la densité de flux conductif dans le Mur du complexe EPLM est approximativement la même pour les deux cas, comme le montre l'analyse de la figure 2.39. Les deux bardages ont donc des comportements relativement différents. Le bardage pin aggloméré absorbe le rayonnement incident ; cette chaleur est alors essentiellement évacuée par la lame d'air. A contrario le bardage pin brut fournit beaucoup moins de chaleur à la lame d'air, mais celle-ci est moins bien évacuée que pour le bardage pin aggloméré. Ces deux comportements aboutissent à des performances très proches aux regards des gradients thermiques horizontaux mesurés dans le Mur placé derrière les bardages bois.

2.6 Analyse des mesures pour le store et le métal déployé

Nous présentons maintenant les mesures pour les deux autres protections solaires, d'abord le métal déployé puis le store. Pour les deux, l'épaisseur de la lame d'air est de 100 mm.

Le banc d'essai permet de faire la mesure pour deux solutions en parallèle. Nous avons fait le choix de laisser le bardage pin brut comme référence tout au long des mesures. Nous présentons ainsi les mesures de vitesses et de densité de flux de chaleur dans le mur pour le bardage brut-clair comme base de comparaison.

2.6.1 Le métal déployé

Nous présentons les mesures correspondantes à la séquence n°9, c'est-à-dire pour la protection solaire en métal déployé avec une épaisseur de lame d'air de 100 mm. La densité de flux solaire incident est illustrée sur la figure 2.40, et la vitesse de vent extérieur sur la figure 2.41.

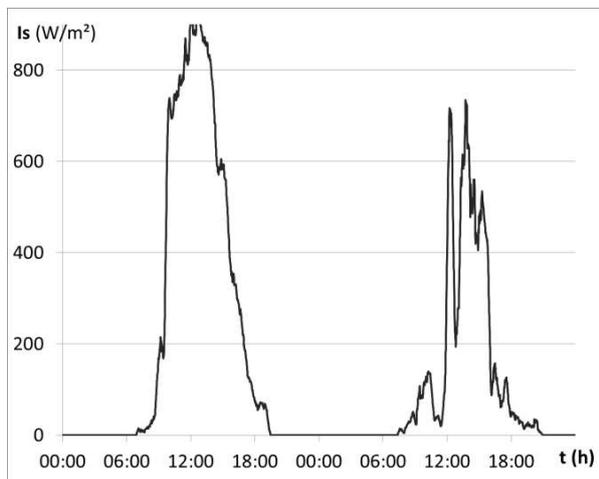


Figure 2.40 : Densité de flux solaire incident pour la séquence n°9

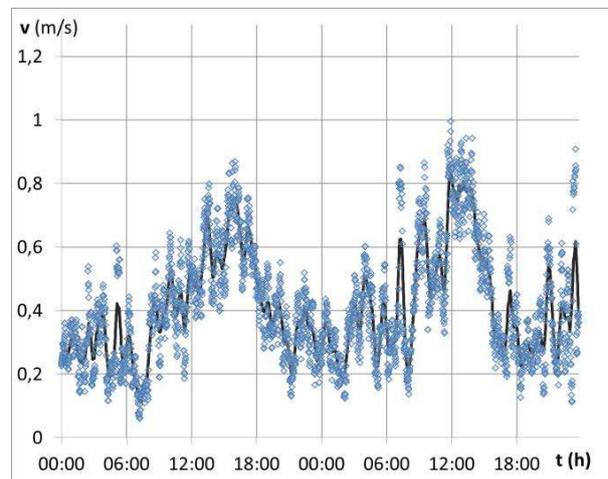


Figure 2.41 : Vitesse de vent extérieur pour la séquence n°9. Les points, les mesures à chaque pas de temps, en trait plein, la moyenne mobile de ces mesures.

Les températures d'air aux trois hauteurs de la lame d'air T_{L_b} , T_{L_m} et T_{L_h} sont tracées sur la figure 2.42. La vitesse verticale d'écoulement de l'air dans la lame est tracée sur la figure 2.43, ainsi que celle derrière le bardage pin brut comme référence.

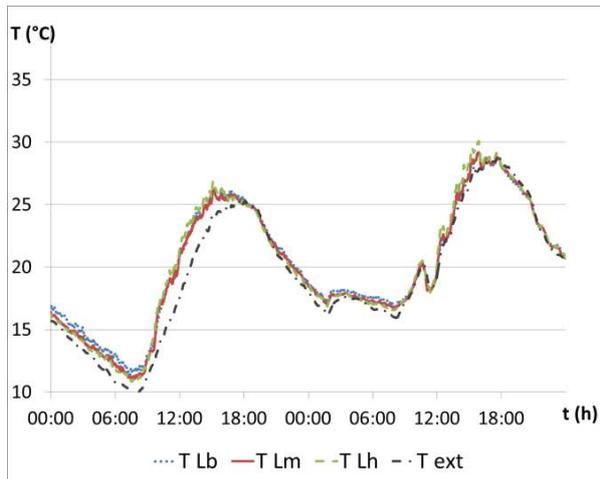


Figure 2.42 : Températures aux trois hauteurs dans la lame d'air, cas du métal déployé, séquence n°9

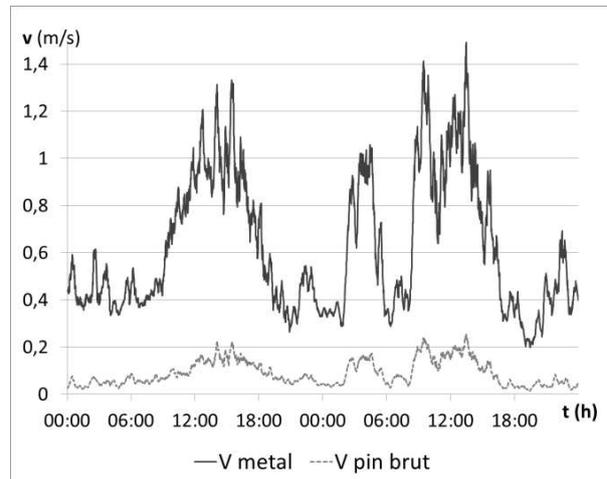


Figure 2.43 : Vitesse d'écoulement de l'air pendant la séquence n°9. En trait plein, cas du métal déployé, en tirets, cas du bardage brut-clair comme référence

Sur la figure 2.42, le gradient vertical de température d'air dans la lame d'air apparaît comme relativement faible, alors que la vitesse d'écoulement mesurée et tracée sur la figure 2.43 est relativement élevée, oscillant entre 0,4 et 1,4 m/s. La vitesse d'écoulement mesurée derrière le bardage brut-clair est très faible, ayant pour vitesse maximale 0,2 m/s.

Le fait que le gradient vertical reste relativement faible, alors que la vitesse mesurée est très élevée comparativement à celle derrière le bardage pin brut, indique que l'écoulement mesuré n'est pas seulement dû à un effet de tirage.

Pour expliquer cette vitesse d'écoulement élevée, deux points doivent être relevés. D'abord, le caractère semi transparent du métal déployé fait qu'une partie du rayonnement incident est directement transmis par le métal déployé et ensuite absorbé par la face extérieure du mur. L'apport de chaleur dans la lame d'air est donc direct et plus élevé que pour les bardages bois qui sont opaques.

Ensuite le fait que la surface de la grille de métal déployé est partiellement ouverte implique que les mouvements de convection dans la lame d'air ne sont pas seulement verticaux. En effet, la différence de pression de part et d'autre de la grille de métal déployé induit un écoulement horizontal. L'effet venturi lié à la réduction de la section de passage peut a priori expliquer les vitesses plus élevées relevées. Ainsi dans ce cas, la corrélation entre la vitesse d'écoulement relevée et le gradient vertical de température d'air dans la lame n'est pas retrouvée.

Sur la figure 2.43, nous pouvons voir que la vitesse de l'écoulement derrière le bardage brut-clair est toujours inférieure à 0,25 m/s, elle est plus faible que pour les cas avec des lames d'air de 33 mm et 66 mm. Pour une lame d'air de 33 mm, la vitesse maximale mesurée est proche de 0,6 m/s, et ici pour une épaisseur de lame d'air trois fois supérieure, la vitesse est approximativement trois fois inférieure. Le débit de renouvellement d'air semble donc se conserver.

Les gradients thermiques horizontaux dans la deuxième couche de plâtre de l'EPLM sont tracés sur la figure 2.44. Nous représentons aussi le cas du bardage brut-clair pour comparaison.

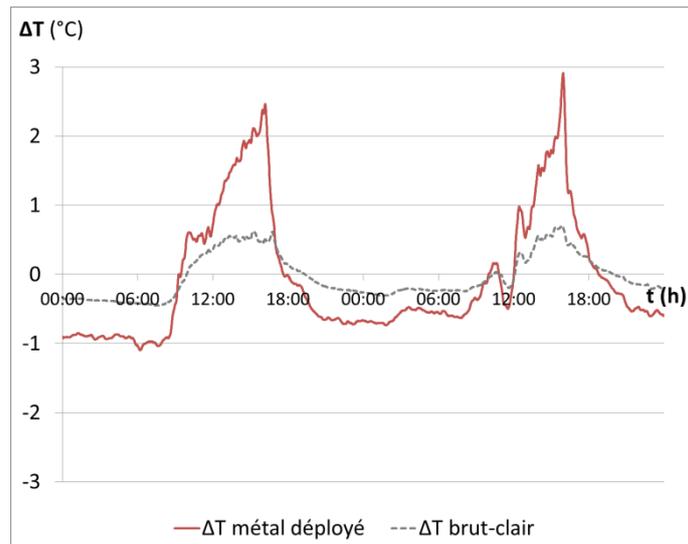


Figure 2.44 : Evolution du gradient thermique horizontal (°C) dans la 2ème couche de plâtre pour la séquence n°9. En trait plein, le cas du métal déployé, en tirets, le bardage brut-clair

Le gradient thermique horizontal derrière le métal déployé varie entre -1 °C et 3 °C. Les maximums s’expliquent par le caractère semi-transparent du métal déployé. Ainsi, il y a un apport direct de chaleur sur la face externe du mur.

Nous remarquons que le gradient thermique horizontal mesuré derrière le bardage brut-clair est du même ordre de grandeur que celui mesuré pour le cas avec lame d’air de 66 mm, visible sur la figure 2.39.

Nous pouvons en conclure que les apports de chaleur associés au flux radiatif incident sont moins limités par le métal déployé que par le bardage brut-clair.

2.6.2 Le store

Nous présentons les mesures correspondant à la séquence n°7, la protection solaire est le store et l’épaisseur de lame d’air est de 100 mm. La densité de flux solaire incident est illustrée sur la figure 2.45, et la vitesse de vent extérieur sur la figure 2.46. Comme on peut le voir, la première journée est partiellement ensoleillée alors que la deuxième l’est fortement.

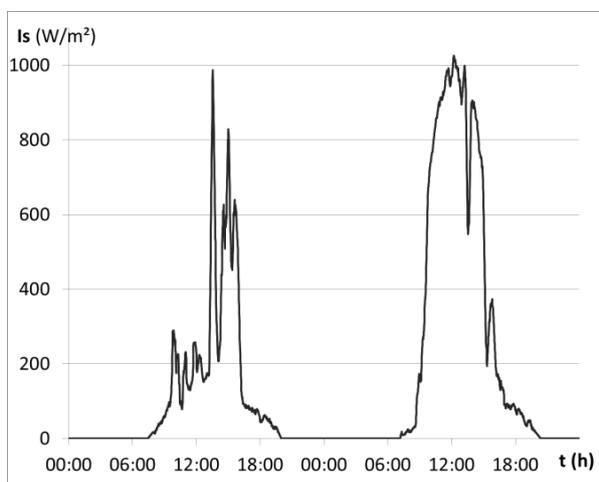


Figure 2.45 : Densité de flux solaire incident pour la

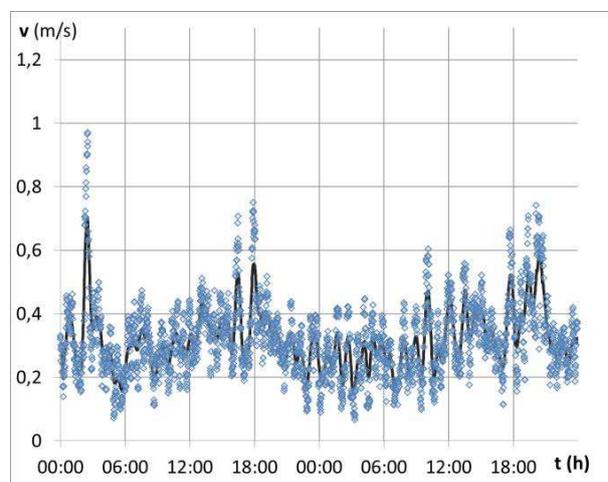


Figure 2.46 : Vitesse de vent extérieur pour la séquence n°7. Les points, les mesures à chaque pas de temps, en

Les températures aux trois hauteurs de la lame d'air T_{L_b} , T_{L_m} et T_{L_h} sont tracées sur la figure 2.47. La vitesse d'écoulement verticale de l'air est tracée sur la figure 2.48, ainsi que celle derrière le bardage brut-clair par comparaison.

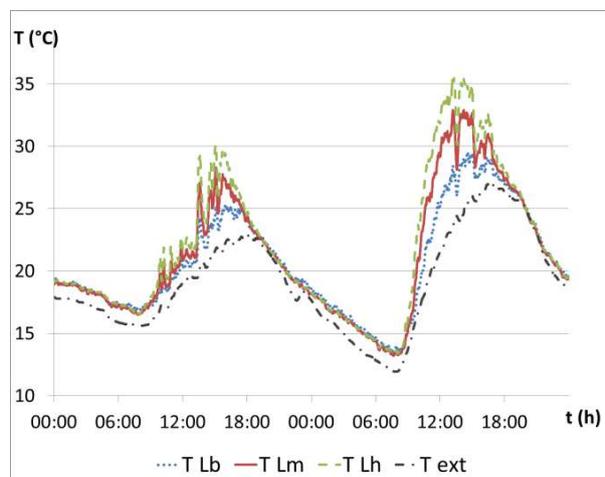


Figure 2.47 : Températures aux trois hauteurs dans la lame d'air, cas du store, séquence n°7

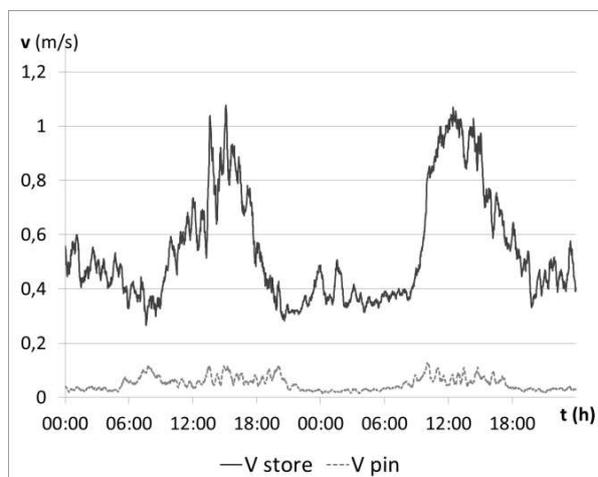


Figure 2.48 : Vitesses d'écoulement mesurées, cas du store, séquence n°7

Sur la figure 2.47, nous pouvons voir que les variations de températures dans la lame d'air sont fortes et sont très sensibles à l'ensoleillement (en comparant les figures 2.45 avec 2.47). Le gradient vertical de température d'air est conséquent la seconde journée quand l'apport solaire est élevé. La vitesse de l'écoulement de l'air varie entre 0,4 m/s et 1 m/s et peut donc être qualifiée d'élevée.

Le store est partiellement transparent, très mince, bon conducteur, et de couleur foncée absorbant ainsi bien le rayonnement incident. La chaleur transmise à la lame d'air est donc élevée. Cet apport de chaleur se traduit par un fort mouvement de convection dans la lame d'air, ce qui explique le fort gradient de température et la vitesse élevée.

Les gradients thermiques horizontaux dans la deuxième couche de plâtre de l'EPLM sont tracés sur la figure 2.49. Nous représentons aussi le cas du bardage pin brut pour comparaison.

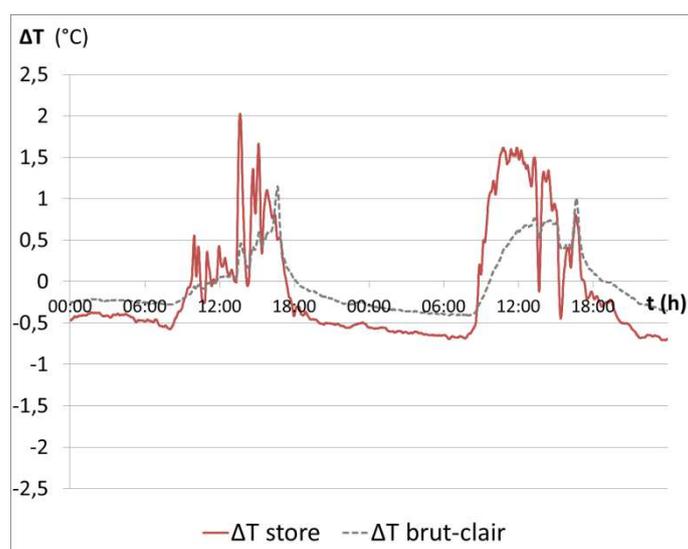


Figure 2.49 : Evolution du gradient thermique horizontal (°C) dans la 2^{ème} couche de plâtre pour le cas store et bardage pin brut pour la séquence n°7

Les évolutions du gradient thermique horizontal mesuré dans le mur derrière le store sont très fortement corrélées à l'ensoleillement. Comme pour le métal déployé, la transparence partielle du store explique ce point.

Ensuite, le maximum du gradient thermique horizontal est de l'ordre de 2 °C, ce qui est deux fois supérieures à celui derrière le bardage pin blanc.

2.7 Analyse de la vitesse d'écoulement

2.7.1 Présentation d'une séquence de mesures pour le bardage brut-clair

De manière à étudier plus finement les écoulements dans la lame d'air, trois anémomètres ont été disposés dans la lame d'air aux trois hauteurs (z_b , z_m , z_h) pour une période de mesures de quelques jours correspondant à la séquence n°1 (cf tableau 2.2). La protection solaire était le bardage pin brut de couleur claire et l'épaisseur de la lame d'air est de 33 mm. Nous analysons ici ces mesures.

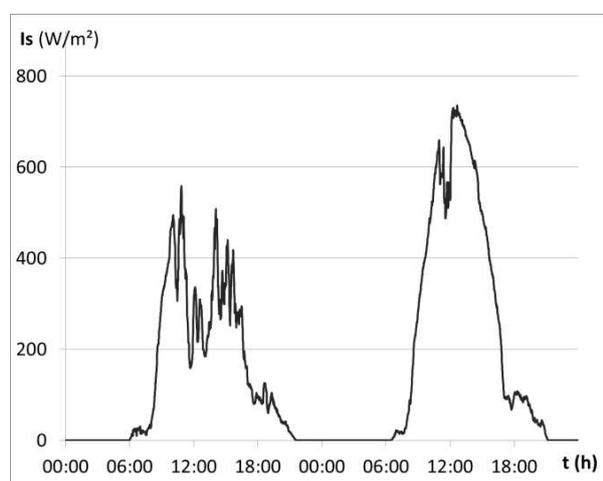


Figure 2.50 : Eclairement mesuré (W/m^2) pendant la séquence n°1.

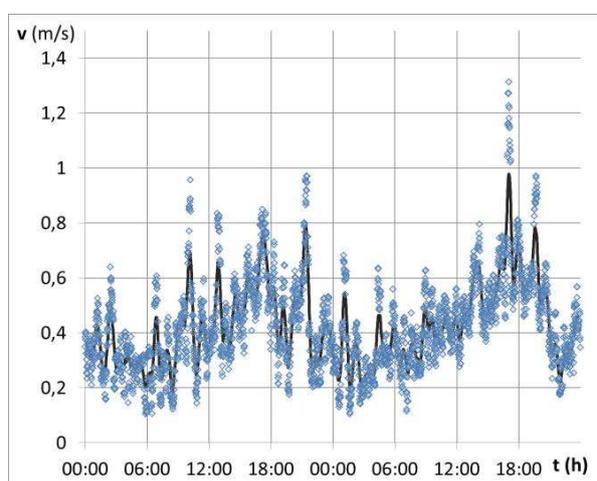


Figure 2.51 : Vitesse de vent extérieure mesurée (m/s) pendant la séquence n°1. Les points, les mesures ponctuelles, et le trait plein, la moyenne mobile

La figure 2.50 montre l'évolution du flux solaire radiatif incident, et la figure 2.51, la vitesse de vent extérieur mesurée.

La figure 2.50 permet de voir que la première des deux journées de mesure est partiellement ensoleillée, alors que la deuxième l'est de manière continue à l'exception d'un épisode nuageux à la mi-journée.

Sur la figure 2.51, nous pouvons voir que l'évolution de la vitesse de vent extérieure est plutôt erratique. On peut cependant constater que la vitesse de vent est un peu plus rapide la journée. Les vitesses de vent mesurées peuvent être qualifiées de relativement faibles. Ceci peut être expliqué par le fait que le banc d'essai est installé dans un endroit relativement fermé et que les conditions météorologiques étaient de type anticyclonique.

Les mesures de températures d'air dans la lame d'air aux trois hauteurs ainsi que la mesure de la température d'air extérieur apparaissent sur la figure 2.52.

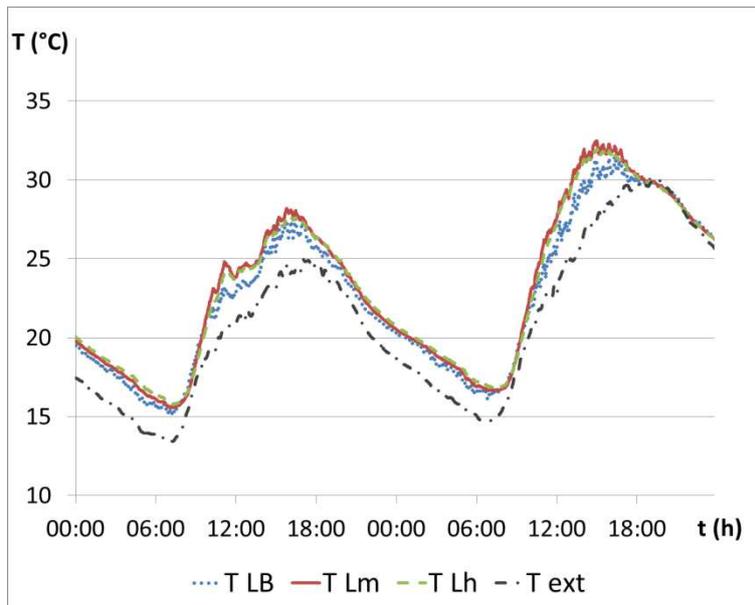


Figure 2.52 : Températures d'air mesurées dans la lame d'air (z_b en bleu, z_m en rouge, et z_h en vert), et à l'extérieur (pointillés noirs) pendant la séquence n°1.

Les températures dans la lame d'air, visibles sur la figure 2.52, oscillent entre 15 et 32°C. Ces températures sont toujours supérieures à la température d'air extérieur.

Nous retrouvons bien le gradient vertical de température dans la lame d'air, associé à l'écoulement ascendant, qui a lieu pendant la période ensoleillée.

L'évolution des vitesses mesurées aux trois hauteurs est visible sur la figure 2.53.

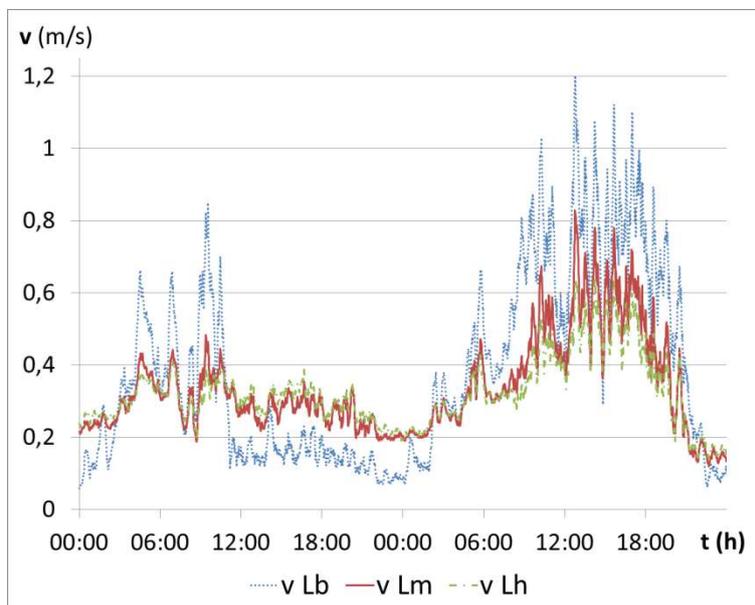


Figure 2.53 : Vitesses d'air mesurées dans la lame d'air (z_b en bleu, z_m en rouge, et z_h en vert)

Sur la figure 2.53, il apparaît que les vitesses mesurées au milieu et en haut de la lame d'air ont de très fortes correspondances. La vitesse mesurée en partie basse, a le même type de variations mais celles-ci ont de plus grandes amplitudes.

Les vitesses d'air mesurées prennent des valeurs entre 0,1 m/s et 1 m/s. Pour les vitesses au centre et en haut de la lame d'air, les vitesses mesurées la nuit sont de l'ordre de 0,2 m/s, et la vitesse maximale de l'ordre de 0,6 m/s.

Nous retrouvons bien le phénomène de convection naturelle. Pour la 2^{ème} journée, le flux solaire incident commence à 7:00. Le gradient vertical de température visible sur la figure 2.52 et l'augmentation des vitesses mesurées dans la lame d'air commencent sensiblement au même moment.

2.7.2 Lien entre vitesse de vent extérieur et vitesse dans la lame d'air

Les variations de températures extérieures (figure 2.52) et de flux solaire incident (figure 2.50) pour la deuxième journée se font de manière régulière sur des périodes longues. La vitesse d'air dans la lame d'air (figure 2.53) pour la deuxième journée varie, elle, de manière plus rapide ; certaines variations se font ainsi sur des périodes de l'ordre de la dizaine de minutes. On en déduit que les variations rapides de la vitesse d'écoulement de l'air dans la cavité ne peuvent s'expliquer par le flux solaire incident ou la différence de température entre l'air extérieur et l'air de la lame.

Ces variations sont à rapprocher de celles de la vitesse de vent extérieur. Sur la figure 2.54, les évolutions des vitesses mesurées dans la lame d'air en partie basse et à hauteur médiane sont tracées comparativement avec la mesure de vent extérieur. On peut voir qu'il y a une certaine concordance entre les variations de la vitesse de vent extérieur et les vitesses mesurées dans la lame d'air.

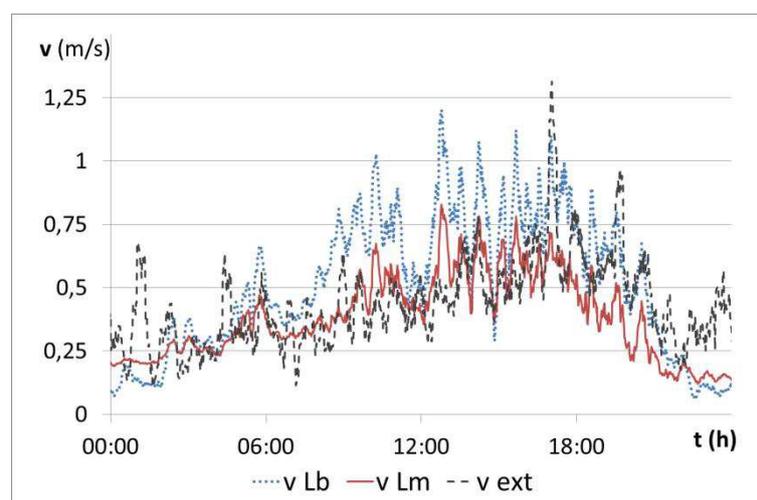


Figure 2.54 : Vitesses d'air mesurées dans la lame d'air et à l'extérieur, journée du 31/07, séquence n°1. Pointillés bleus, à hauteur basse de la lame d'air. En ligne continue rouge, à la hauteur médiane de la lame d'air. Tirets noirs : vitesse de vent extérieur.

De plus, les variations sont beaucoup plus fortes pour la vitesse d'air mesurée en partie basse. Cette variation se retrouve pour les mesures de température de l'air dans la cavité (figure 2.52) : les variations de la T_{L_b} sont là aussi plus grandes que celles au milieu T_{L_m} et en partie haute T_{L_m} de la lame d'air. Ce constat renforce l'idée que l'air s'engouffre en partie basse de la lame d'air, et perturbe alors l'écoulement lié seulement au tirage thermique.

Mayer et Künzle (1983) et Falk (2012) notaient aussi l'impact de la vitesse de vent extérieur sur l'écoulement intérieur. Mayer et Kunzel précisait que l'orientation du vent influence plus la vitesse d'écoulement dans la lame d'air que la vitesse de vent extérieur. Dans notre travail, l'orientation du vent n'a pas été relevée, nous ne pouvons pas vérifier ce point.

De ces constats, il apparaît nécessaire de distinguer les variations de vitesse de vent sur les périodes courtes des variations à l'échelle de la journée. La vitesse d'air ascendante dans la lame d'air due au phénomène de tirage thermique, correspond à la part la plus régulière.

2.7.3 Vitesse au centre de la lame d'air et vitesse de renouvellement d'air

Nous voulons ici faire le lien entre la vitesse d'air mesurée au centre de la lame d'air et la vitesse associée au renouvellement d'air qui, elle, correspond à la vitesse moyenne sur la section de l'épaisseur de lame d'air.

Dans le premier chapitre, nous avons représenté sur la figure 1.9 la forme de l'écoulement dans la lame d'air. En régime laminaire, la forme de l'écoulement est connue. Si les apports de chaleur sont les mêmes de chaque côté de la lame d'air, alors c'est une forme parabolique qui prend son maximum au milieu de la lame d'air et qui est nulle à l'interface entre l'air et les surfaces délimitant la lame d'air. Dankovic *et al.* (2006) montrent que quand l'écoulement est en régime laminaire établie, le rapport de la vitesse moyenne v sur la vitesse maximale v_{max} est de $2/3$.

Dans le protocole expérimental ici utilisé, les anémomètres à fil chaud sont placés au milieu de l'épaisseur de lame d'air, mesurant donc la vitesse maximale.

Falk *et al.* (2012) ont vérifié de manière expérimentale cette relation entre vitesse maximale et vitesse moyenne sur la section. Il a étudié un bardage opaque posé sur des liteaux verticaux sur sa partie extérieure. Le débit de renouvellement d'air est forcé par un système de ventilation, et il mesure la vitesse d'écoulement au centre de la lame d'air. Il trouve alors des rapports entre 0,61 et 0,69 ce qui correspond bien à la théorie.

Dans la suite de l'étude, pour évaluer le débit de renouvellement d'air à partir des mesures, nous utiliserons alors ce rapport de $2/3$.

Il faut cependant remarquer que l'hypothèse selon laquelle l'apport de chaleur dans la lame d'air est symétrique n'est pas vérifiée dans les cas étudiés. La forme de l'écoulement peut alors être différente et le rapport entre la vitesse mesurée au centre de la lame d'air et la vitesse moyenne sur la section peut être autre.

2.8 Analyse qualitative de l'écoulement

Nous voulons ici expliquer comment l'écoulement vertical par convection naturelle se caractérise.

2.8.1 Mise en place de l'écoulement

L'écoulement vertical prend place quand la différence de pression entre l'extérieur de la lame d'air et l'intérieur de celle-ci est non nulle. Cependant, cette différence de pression peut intervenir de différentes manières. Nous présentons ici ces situations.

Considérons le système à l'équilibre thermique. La température dans la lame d'air est égale à la température extérieure.

Quand la protection solaire est chauffée par le rayonnement solaire incident, une partie de cette chaleur est conduite vers la lame d'air. L'air de la lame d'air est alors chauffé par échanges convectifs. Sa pression diminue, entraînant une différence de pression motrice entre la lame d'air et l'air extérieur. Celle-ci ne détermine pas en soi le sens de l'écoulement. C'est le fait que l'air de la cavité chauffé par convection a sa masse volumique qui diminue, et devient ainsi plus « léger », qui induit le mouvement de convection ascendant. C'est donc la différence de pression motrice qui crée le mouvement, et celui-ci est entretenu par le fait que l'air est chauffé par échange convectif avec les surfaces délimitant la cavité.

Cette situation est la plus classique, et la plus étudiée.

Une augmentation de la température extérieure, comme il peut y avoir en début de journée, se traduit par une baisse de la pression de l'air extérieur. Ainsi la différence de pression entre l'air extérieur et l'intérieur est positive induisant une pression motrice entre les deux milieux. L'air extérieur peut entrer par la partie haute de la lame d'air, et être refroidi par échange convectif avec les surfaces délimitant la lame d'air. Ce refroidissement entraîne une augmentation de sa masse volumique, et donc un écoulement vertical descendant. Cette situation est ainsi l'opposée de la situation classique d'écoulement ascendant.

Nous ne pouvons pas avec précision identifier de tels écoulements à partir des mesures qui ont été faites. Cependant ce point permet de montrer que quand les différences de pression motrices sont faibles et peuvent potentiellement changer de signe, l'écoulement peut subir de fortes variations, notamment de sens. A l'opposé quand l'apport de chaleur est conséquent et que la différence de pression motrice est forte, l'écoulement est bien en place. Ceci correspond aux remarques faites par Falk *et al.* (2012), qui remarque que la dépendance au vent extérieur devient faible quand l'apport de chaleur est élevé et l'écoulement alors bien établi.

Il apparaît que le terme qui définit le sens de l'écoulement est la différence entre la température de parois de la lame d'air et la température extérieure. Ainsi le signe du nombre de Rayleigh écrit selon l'équation (E 2.1) en définit le sens de l'écoulement.

$$Ra_H = Gr * Pr = \frac{g\beta\rho^2 H^3}{\mu^2} \left(\frac{T_{P_i} + T_{M_o}}{2} - T_{ext} \right) * Pr \quad (E 2.1)$$

Nous présentons plus loin une analyse de la corrélation entre le nombre de Rayleigh calculé à partir des mesures, et la vitesse d'écoulement mesurée pour les séquences présentées 2.5 et 2.6.

2.8.2 Régime d'écoulement et nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement d'un fluide. Pour un écoulement entre deux plaques, et selon les notations de la figure 1.9, le nombre de Reynolds est défini par :

$$Re = \frac{v * 2e_{la} * \rho}{\mu}$$

Pour calculer le nombre de Reynolds, nous utilisons la vitesse d'écoulement d'air mesurée à mi-hauteur de la lame d'air auquel nous appliquons le coefficient 2/3 pour calculer la vitesse moyenne sur la section.

Pour la séquence n°2 (cf tableau 2.2), et pour les bardages en pin brut, et en pin aggloméré, les nombres de Reynolds sont calculés et leurs évolutions apparaissent sur la figure 2.55.

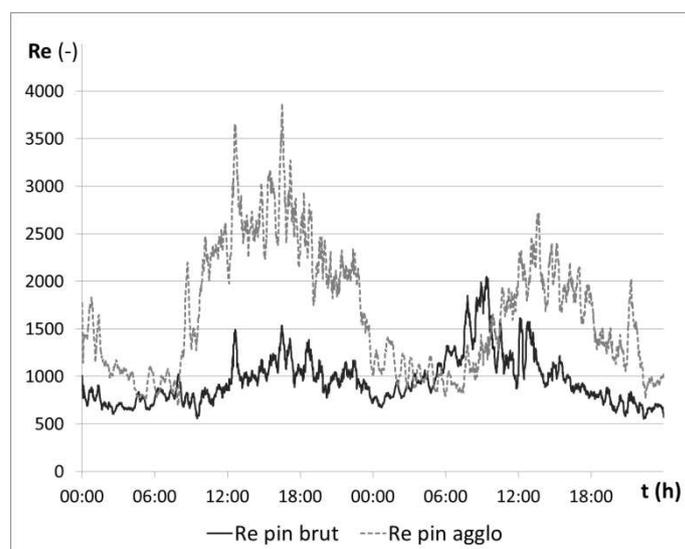


Figure 2.55 : Nombres de Reynolds calculés pour la séquence 2. Ligne continue, pour le bardage brut-clair, pointillés, pin aggloméré.

Nous utilisons ici le nombre de Reynolds dans l'approximation d'un régime établi entre deux plaques, en considérant l'écoulement comme la résultante de l'effet d'un tirage thermique.

Sur la figure 2.55, nous pouvons voir que pour le cas du bardage brut-clair le nombre de Reynolds est le plus souvent inférieur à 2000, ce qui traduit un écoulement essentiellement en régime laminaire. Le nombre de Reynolds correspondant à l'écoulement de l'air derrière le bardage aggro-rouge prend des valeurs supérieures à 2000 pendant la journée, alors que la nuit, les valeurs sont inférieures à 2000. Il faut remarquer que les fortes augmentations de vitesse ponctuelles correspondent à des variations de vitesse de vent extérieur. Ainsi dans le cas du bardage aggro-rouge, le régime d'écoulement est transitoire voire turbulent quand les apports radiatifs sont les plus forts. Le vent extérieur favoriserait le caractère turbulent de cet écoulement par les variations de vitesse induites.

2.8.3 Etude de la corrélation entre nombre de Rayleigh et vitesse mesurée

Comme nous l'avons relevé dans le paragraphe 1.3.2.2, Aung *et al.*, (72) ont montré que le nombre de Rayleigh caractérise la convection naturelle qui prend place entre deux plaques chauffées. Des études portant sur la convection naturelle dans un canal ouvert ont consisté en la réalisation de calculs CFD pour différentes configurations, et ont aboutis à des corrélations entre le débit de renouvellement d'air dans la lame d'air et le nombre de Rayleigh. Ainsi, Aung *et al.* (72) l'ont fait pour une cavité ouverte chauffée asymétriquement et Zamora et Kaiser (2009) ou Gan (2011) pour une cheminée solaire.

Nous présentons ici les nombres de Rayleigh calculés à partir des mesures réalisées et les comparons aux vitesses de renouvellement d'air mesurées. Les températures des surfaces délimitant la lame d'air sont calculées comme les moyennes des températures de surfaces aux trois hauteurs considérées. La vitesse de l'écoulement d'air est celle correspondant au renouvellement d'air.

Les données de la séquence n°2 sont utilisées pour les cas des bardages en pin aggloméré et en pin brut pour une lame d'air de 33 mm. Les nombres de Rayleigh et les vitesses de renouvellement d'air sont tracés sur la figure 2.56 pour le cas du bardage aggro-rouge, et sur la figure 2.57 pour le cas du bardage brut-clair.

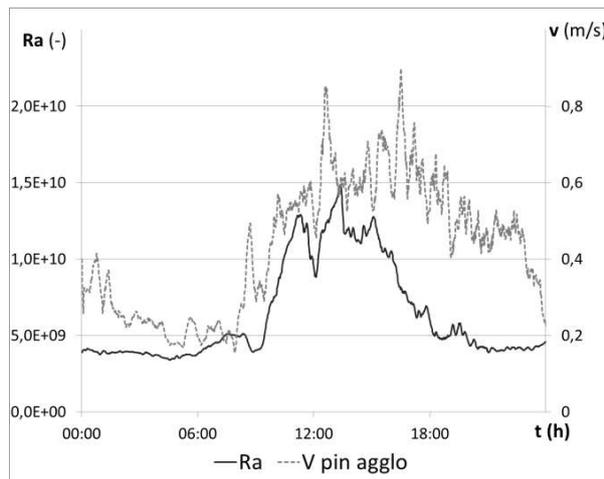


Figure 2.56 : Nombre de Rayleigh (trait plein) et vitesse de renouvellement d'air mesurée (pointillés) pour la séquence n°2, cas bardage aggro-rouge

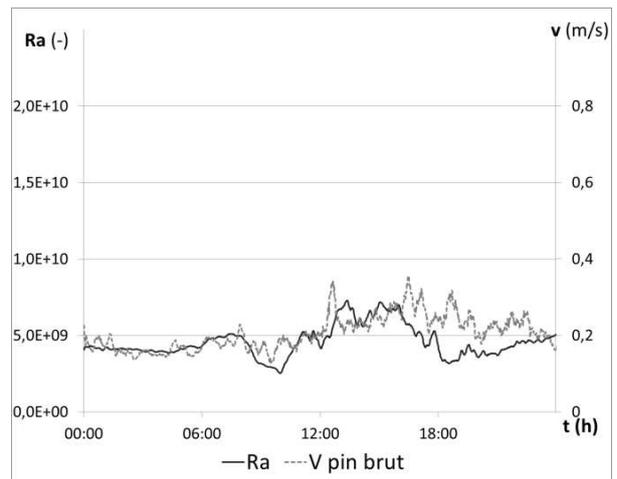


Figure 2.57 : Nombre de Rayleigh (trait plein) et vitesse de renouvellement d'air mesurée (pointillés) pour la séquence n°2, cas bardage brut-clair

Les données de la séquence n°4 sont utilisées pour les cas des bardages en pin aggloméré et en pin brut pour une lame d'air de 66 mm. Les nombres de Rayleigh et les vitesses de renouvellement d'air sont tracés sur la figure 2.58 pour le cas du bardage aggro-rouge, et sur la figure 2.59 pour le cas du bardage brut-clair.

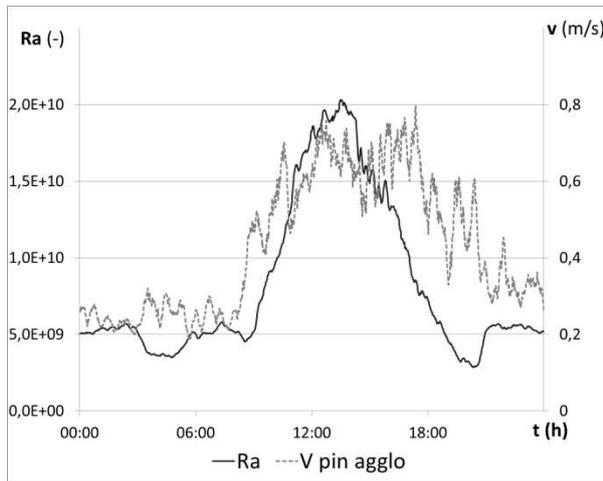


Figure 2.58 : Nombre de Rayleigh (trait plein) et vitesse de renouvellement d'air mesurée (pointillés) pour la séquence n°4, cas bardage aggro-rouge

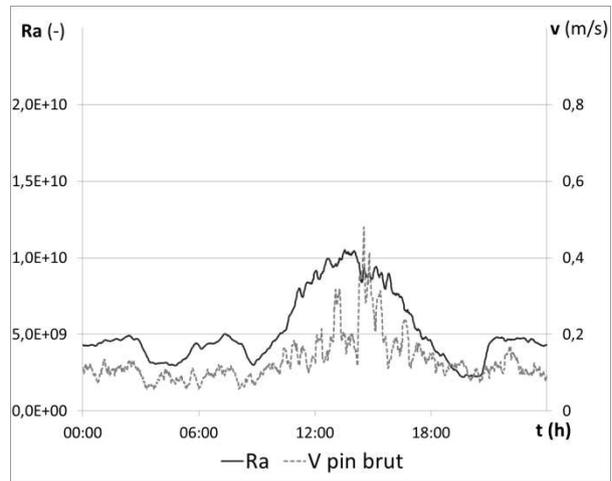


Figure 2.59 : Nombre de Rayleigh (trait plein) et vitesse de renouvellement d'air mesurée (pointillés) pour la séquence n°4, cas bardage brut-clair

Les données des séquences n°9 et n°7 sont utilisées pour les cas du métal déployé et pour une lame d'air de 100 mm. Les nombres de Rayleigh et les vitesses de renouvellement d'air sont tracés sur la figure 2.60 pour le cas du métal déployé, et sur la figure 2.61 pour le cas du store.

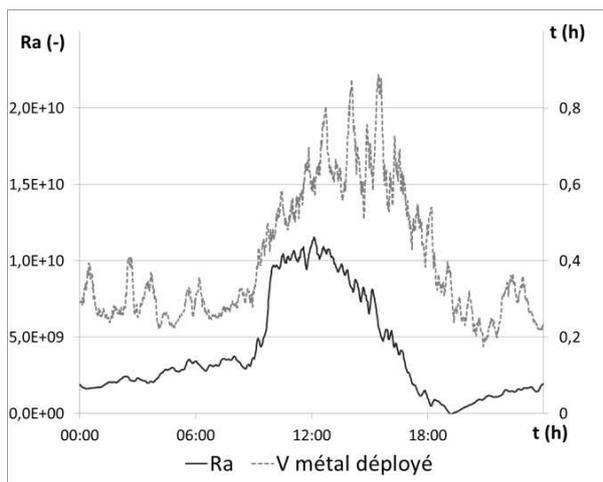


Figure 2.60 : Nombre de Rayleigh (trait plein) et vitesse de renouvellement d'air mesurée (pointillés) pour la séquence n°9, cas métal déployé

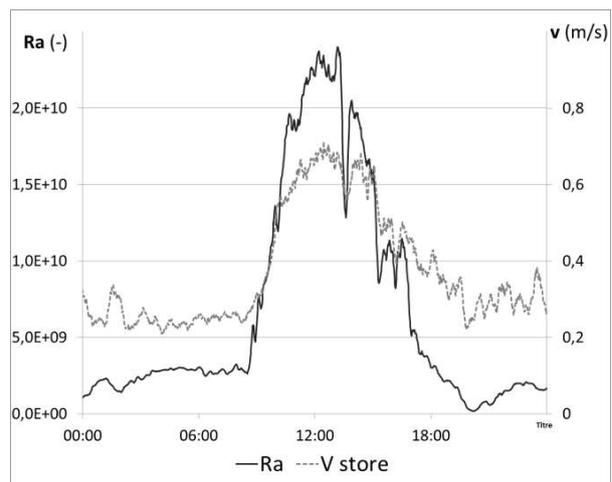


Figure 2.61 : Nombre de Rayleigh (trait plein) et vitesse de renouvellement d'air mesurée (pointillés) pour la séquence n°7, cas store

Pour tous les cas ici présentés, les valeurs des nombres de Rayleigh se situent entre 5×10^9 et 2×10^{10} , ce qui correspond essentiellement à un régime de transition entre l'écoulement laminaire et turbulent. On retrouve bien la même conclusion que celle issue de l'analyse du nombre de Reynolds.

Les figures 2.57 et 2.59, correspondant aux nombres de Rayleigh calculés pour les cas du bardage brut-clair, montrent une corrélation relativement faible entre la vitesse de renouvellement d'air mesurée et la valeur du nombre de Rayleigh. L'apport de chaleur n'est pas assez fort pour établir un mouvement convectif établi.

Pour le cas du bardage aggro-rouge qui fournit plus de chaleur à la lame d'air, les variations des nombres de Rayleigh et des vitesses de renouvellement d'air mesurées apparaissent plus nettement sur les figures 2.56 et 2.58.

Nous remarquons aussi que pour le bardage aggro-rouge la concordance entre les moments auxquels commencent l'augmentation du nombre de Rayleigh et l'augmentation de la vitesse d'écoulement est bonne. Mais il y a un décalage net entre les moments où commencent les diminutions du nombre de Rayleigh et de la vitesse d'air. Le déphasage du premier par rapport au deuxième est de l'ordre de 2 heures, ce qui traduit une certaine forme d'inertie.

Cette inertie peut correspondre à la chaleur stockée au niveau du bardage mais aussi par les éléments proches du bardage (le revêtement goudronné et le mur béton adjacent). La chaleur stockée induit une augmentation en température qui n'est pas traduite par le nombre de Rayleigh, ni par la température extérieure mesurée. Ainsi localement, la température d'air est plus élevée, et donc la pression plus basse, favorisant ainsi le mouvement de convection dans la lame d'air.

C'est pour le store dans le cas d'une épaisseur de lame d'air de 100 mm, que la corrélation entre les variations du nombre de Rayleigh et la vitesse de renouvellement d'air mesuré est la plus évidente (figure 2.61). L'augmentation du nombre de Rayleigh se fait au même moment que l'accélération de l'écoulement de l'air, et de la même façon, la baisse du nombre de Rayleigh correspond à la baisse de la vitesse de renouvellement d'air.

Il faut remarquer que le store est un bon capteur qui transmet très rapidement cette chaleur absorbée à la lame d'air, et que dans ce cas, l'inertie est très faible.

Nous pouvons donc dire que de manière qualitative nous retrouvons des corrélations entre le nombre de Rayleigh et la vitesse de renouvellement d'air. Mais il faut préciser que celles-ci sont identifiables lorsque leurs valeurs sont élevées c'est-à-dire que la chaleur fournie à la lame d'air est élevée. Pour le bardage brut-clair, l'apport de chaleur est trop faible et il n'est pas possible d'isoler le mouvement convectif dû au phénomène de tirage thermique des autres phénomènes en jeu comme l'influence du vent extérieur.

2.8.4 Ecoulement nocturne

Nous avons remarqué que la vitesse d'écoulement dans les lames d'air n'est jamais nulle la nuit. A partir des graphes de températures dans la lame d'air et de vitesse d'écoulement présentés dans les parties 2.5 et 2.6, nous remarquons certains points.

- Pour les bardages bois, la vitesse moyenne d'écoulement pendant la nuit diminue quand l'épaisseur de lame d'air augmente.
- Pour chaque épaisseur de lame d'air, on retrouve que la vitesse d'écoulement la nuit est plus faible pour le cas du bardage brut-clair que pour le cas du bardage aggro-rouge.
- Pour les mêmes conditions météorologiques et pour les mêmes épaisseurs de lame d'air, la vitesse d'écoulement la nuit n'est pas la même pour les différentes protections solaires. Elle est d'autant plus élevée que la vitesse maximale atteinte pendant la journée est élevée.
- Le gradient vertical de température d'air dans lame d'air est très faible la nuit pour toutes les protections solaires, ce qui traduit un faible transport de chaleur.

Dans une expérience similaire d'un bardage bois à claire voie instrumenté, Labat (2012) mesure des vitesses la nuit oscillant entre 0,1 et 0,3 m/s. Il rejoint les conclusions de Marinosci *et al.* (2011), qui expliquent qu'à ces faibles vitesses la précision des instruments de mesure est faible rendant critique

la mesure de l'écoulement la nuit. Il utilise alors, comme Hägersted et Hardeerup (2011), une vitesse constante la nuit.

Le lien entre la vitesse maximale atteinte la journée et la vitesse la nuit indique que plus la charge en température est élevée pendant la journée, plus la vitesse d'écoulement la nuit est élevée. La vitesse d'écoulement correspond alors à une évacuation de cette chaleur, mais comme le gradient vertical de température d'air, le transfert de chaleur reste faible et peut ainsi durer toute la nuit.

Cette vitesse résiduelle peut ainsi être liée au stockage de chaleur et à l'épaisseur de lame d'air, tout comme la vitesse maximale atteinte la journée. Nous proposons ainsi une loi empirique qui lie la vitesse maximale atteinte la journée à la vitesse résiduelle nocturne.

Nous avons pour cela évalué les vitesses maximales diurnes et les vitesses moyennes nocturnes pour chaque configuration, c'est-à-dire pour chaque couple [protection solaire, épaisseur de lame], parmi les 4 protections solaires étudiées et les trois épaisseurs de lame d'air. Nous traçons sur la figure 2.62 ces vitesses maximales diurnes en fonction des vitesses moyennes nocturnes. Le fait que plus la vitesse maximale diurne est élevée, plus la vitesse moyenne nocturne sera élevée apparaît bien. Le coefficient reliant ainsi la vitesse moyenne nocturne à la vitesse maximale diurne est 0,4.

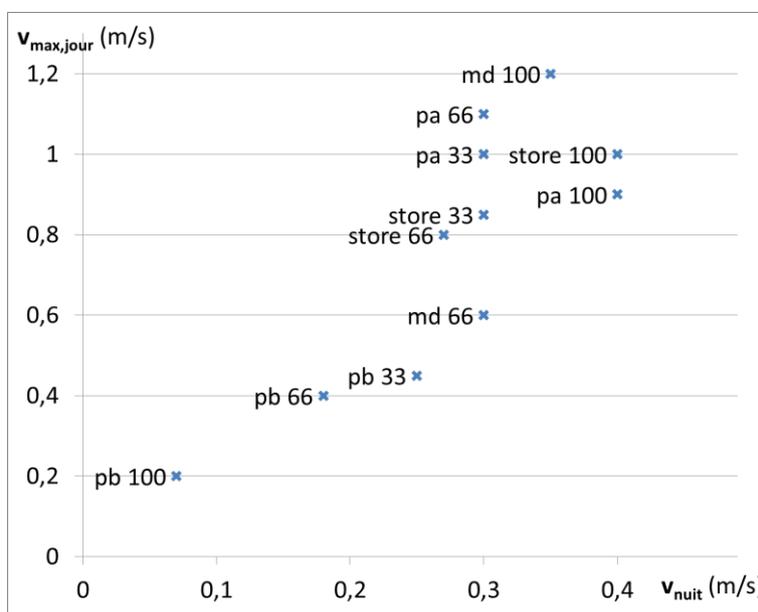


Figure 2.62 : Vitesse maximale diurne en fonction de la vitesse moyenne nocturne pour chaque configuration. pb correspond à bardage brut-clair, pa bardage agglo-rouge, md à métal déployé.

Il est important de noter que les températures de l'air dans la lame d'air, et des surfaces la délimitant sont sensiblement les mêmes pendant la nuit. Ainsi une erreur sur le coefficient de convection a un impact faible sur le calcul des flux de chaleur.

2.9 Conclusion

2.9.1 Sur l'analyse données mesurées

Nous avons présenté les données mesurées pour un certain nombre de cas représentatifs. L'analyse a porté sur les températures d'air et de surfaces au niveau de la lame d'air, et la vitesse de l'écoulement.

La performance des protections solaires a été évaluée de manière relative en calculant à partir des mesures, la densité de flux de chaleur dans la 2^{ème} couche de plâtre de l'EPLM. La densité de flux de chaleur ainsi calculée est très proche pour les deux bardages bois. Ceci alors que leurs propriétés thermiques sont bien différentes. De manière schématisée, le bardage en pin aggloméré absorbe une grande partie du rayonnement incident et le transmet bien à la lame d'air, le mouvement de convection induit est alors conséquent et l'évacuation de chaleur élevée. Le bardage brut-clair, absorbe moins de chaleur, et comme sa résistance thermique est plus élevée, une plus grande partie est rééchangé avec l'air extérieur. Ainsi la part transmise à la lame d'air est faible, le mouvement de convection l'est alors lui aussi.

Pour le store et le métal déployé, les vitesses mesurées sont nettement plus élevées. En effet, de par le caractère partiellement transparent, la chaleur donnée à la lame d'air est plus grande. Il faut aussi noter qu'ils sont de très faible épaisseur et très fins, faisant que le rayonnement solaire absorbée sur la face externe est en grande partie transmis à la lame d'air.

2.9.2 Sur l'écoulement

L'influence du vent a été relevée ; nous ne trouvons cependant pas de lien direct entre son intensité et l'écoulement induit dans la lame d'air, ce qui rejoint les conclusions de Mayer et Kunzel (1983) qui ont montré que l'orientation du vent a une plus grande influence que son intensité.

L'effet du vent se superpose à celui associé au tirage thermique. Pour les bardages bois, on ne peut pas conclure comme Falk (2012), que quand l'écoulement ascendant induit par le rayonnement solaire est bien développé, l'influence du vent est alors nulle. On retrouve par contre bien ce point pour le cas du store par exemple. Il faut ainsi que la chaleur fournie à la lame d'air soit relativement élevée.

Les valeurs des nombres de Reynolds et des Rayleigh calculés à partir des mesures, montrent que pour les cas étudiés, l'écoulement est essentiellement en régime transitoire. De plus pour le store et le bardage aggro-rouge un lien fort apparait entre l'évolution du nombre de Rayleigh et celle de la vitesse d'écoulement. Il est moins clair pour le bardage brut-clair et pour le métal déployé. Pour le premier, nous l'attribuons au fait que l'apport de chaleur à la lame d'air est trop faible, limitant ainsi l'effet de tirage thermique. Pour le second, les trous composant la grille de métal déployé permettent aussi un écoulement horizontal, ainsi la mesure de la vitesse d'air au milieu de la lame d'air ne correspond pas seulement à un renouvellement d'air.

La nuit la vitesse d'écoulement est non nulle, mais le gradient vertical de température dans la lame d'air est très faible. Ce sont les mêmes constats que Labat (2012) ou Marinosci *et al.* (2011). Comme les températures sont sensiblement les mêmes dans la lame d'air et sur les surfaces la délimitant, le transport convectif est faible, et l'erreur associée à une mauvaise détermination de la vitesse d'écoulement de l'air l'est aussi. Nous utilisons une loi empirique qui relie la vitesse maximale atteinte la journée à la vitesse résiduelle nocturne. Celle-ci vaut 4/10 de la vitesse maximale relevée.

Chapitre 3 :

Modélisation des transferts de chaleur dans l'EPLM

3.1 Méthodologie de modélisation de l'EPLM

3.1.1 Choix du modèle, présentation générale

3.1.1.1 Système étudié et transferts de chaleur

L'objectif de ce travail est d'appréhender, par la modélisation, l'impact qu'ont les protections solaires sur les échanges de chaleur à l'échelle d'une paroi. Le système considéré est ici une paroi opaque devant laquelle est placée une protection solaire posée sur des liteaux verticaux, laissant place à une lame d'air qui communique avec l'extérieur par des ouvertures hautes et basses.

Le système étudié est nommé EPLM, pour Extérieur / Protection solaire / Lamé d'air / Mur. Les appellations utilisées sont celles présentées dans la partie expérimentale.

Les phénomènes de transfert de chaleur prenant place sont de trois types :

- La conduction thermique : elle prend place dans les matériaux solides, ici aussi bien le Mur que la Protection solaire, et se caractérise par la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur massique du matériau considéré.
- La convection : Elle prend place dans l'air, et prend deux formes. Le transport convectif associé au renouvellement d'air de la lame d'air est le premier. Les échanges convectifs dans la lame d'air entre la face interne de la protection solaire et l'air, et entre la face externe du mur et l'air par convection naturelle ; et sur la face externe de la protection solaire avec l'air extérieur sous l'effet du vent.
- Le transfert radiatif : le transfert par rayonnement électromagnétique. Il se fait de surface à surface, de part et d'autre de la lame d'air, et entre la surface extérieure de la Protection solaire et son environnement.

La modélisation des transferts de chaleur doit donc considérer ces trois types de transfert, et les décrire en adaptant le degré de précision de cette description aux objectifs visés.

La géométrie étudiée peut être qualifiée de multicouches. Dans les matériaux solides, les échanges se font essentiellement de l'extérieur vers l'intérieur, ce qui constitue la direction principale des transferts. Il faut cependant remarquer que l'écoulement vertical dans la lame d'air impose de prendre en compte un axe vertical de transferts.

Nous présentons un modèle qui décrit les phénomènes de transfert de manière unidirectionnelle, mais qui permet de considérer les trois hauteurs où se font les mesures de températures d'air et de parois présentées dans le chapitre 2. Ce modèle peut donc être qualifié de 1D étendu.

3.1.1.2 Modélisation par analogie rhéoélectrique

Pour résoudre le problème de transfert de chaleur dans une paroi, plusieurs méthodes sont disponibles : méthode des quadripôles, méthode des différences finies, méthodes des volumes finis et autres méthodes. Nous choisissons d'utiliser la méthode de l'analogie rhéoélectrique. Selon cette méthode, un corps homogène et thermiquement mince est modélisé à l'aide d'un couple composé d'une Résistance électrique et d'une Capacité thermique C , où :

$$R = \frac{ep}{2\lambda}, \text{ est la résistance thermique}$$

$$C = mCp, \text{ est la capacité thermique}$$

La figure 3.1 illustre cette méthode de modélisation pour un cas générique, elle représente une couche solide k d'un mur multi-couche. Celle-ci a à sa gauche une autre couche solide, et à sa droite une couche d'air. Une couche est définie comme un corps aux propriétés homogènes. Dans notre cas, ce sont les couches composant EPLM (protection solaire, air, plâtre, plâtre, isolant, béton). Sur la figure 3.1, la couche est elle-même subdivisée en maille (5 dans le cas représenté sur la figure 3.1). Ces mailles sont les éléments de discrétisation de la modélisation. Au centre des mailles, sont placés les nœuds.

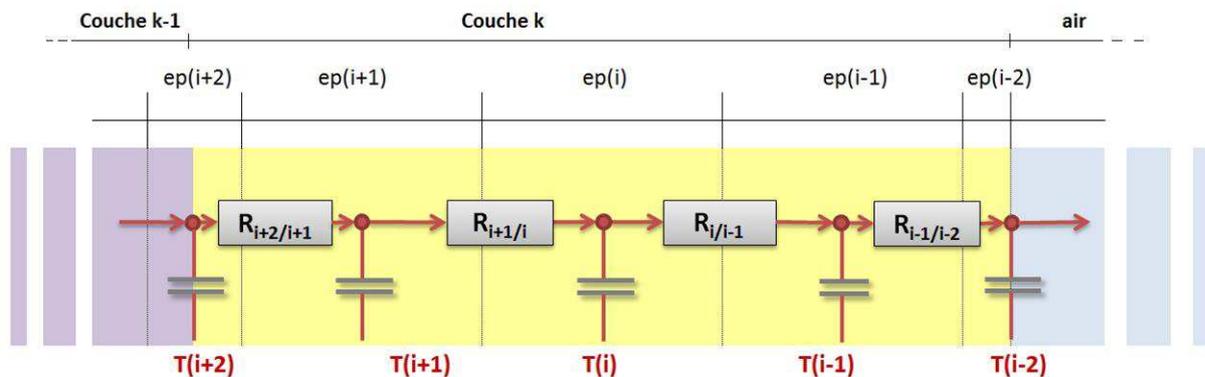


Figure 3.1 : schéma d'emplacement des résistances et capacité dans une couche solide

Ainsi en se plaçant sur la maille i , de la figure 3.1, de température T_i , d'épaisseur ep_i , de surface S_i , le bilan d'énergie s'écrit :

$$ep_i * S_i * \rho_i * Cp_i \frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{R_{i+1/i}} * S_i * (T_{i+1} - T_i) + \frac{1}{R_{i/i-1}} * S_i * (T_{i-1} - T_i) \quad (E 3.1)$$

La modélisation d'un mur implique alors sa décomposition en différentes couches, et à chaque couche est associée une maille et la un couple $[R, C]$.

L'écriture des bilans d'énergie en chaque nœud donne un système d'équations faisant intervenir les températures aux différents nœuds et les différentes résistances et capacités de la modélisation, ainsi que les conditions extérieures. La résolution de ce système d'équations fournit les températures aux différents nœuds.

Ce choix de l'analogie électrique est motivé par le fait qu'il est compatible avec tous les phénomènes considérés tout en étant simple et souvent utilisé, notamment par les plateformes de simulation thermique dynamique du bâtiment.

3.1.2 Présentations des choix de modélisation

3.1.2.1 Schéma RC, épaisseurs des couches et répartition des capacités

La finesse du maillage définit la précision du modèle mais aussi le temps de calcul associé. Le choix de la répartition des nœuds et donc du maillage est un compromis entre la précision recherchée et le temps de calcul

La représentation schématique du modèle appliqué au complexe EPLM est présentée en annexe 1. Nous décrivons ici la répartition des nœuds utilisée.

Un nombre de nœuds par couche de matériau est défini, par défaut il est de 5, comme représenté sur la figure 3.1. Pour chaque couche solide, 2 nœuds sont placés aux extrémités, donc aux interfaces avec d'autres couches et les autres placés de manière géométriquement régulière.

Aux interfaces entre matériaux, une épaisseur plus fine est considérée et la capacité associée est issue des deux matériaux.

Pour la couche correspondant à la lame d'air, une seule maille est considérée avec un nœud en son centre qui correspond la température moyenne de la lame d'air ; les nœuds de part et d'autres sont ceux des températures de surface de la face interne de la protection solaire et de la face externe du mur.

Un autre nœud est considéré du côté intérieur de l'EPLM, il correspond au volume d'air intérieur adjacente au mur d'EPLM, que nous appelons zone intérieure par la suite. Dans le système expérimental présenté dans le chapitre 2, c'est l'air du local qui abrite le matériel d'acquisition, situé juste derrière le banc expérimental.

Ainsi le nombre total de nœuds est de 24.

3.1.2.2 Validation du modèle RC pour les transferts conductifs

Afin d'utiliser cette approche par analogie électrique dans le modèle EPLM, nous avons tout d'abord effectué une validation de celle-ci.

Pour cela, nous considérons des sollicitations extérieures pour lesquelles la forme de la diffusion de la chaleur dans une paroi multi-couche est connue, c'est-à-dire qu'il est possible de calculer analytiquement l'évolution de la température en différents points de cette paroi. Nous comparons ensuite les évolutions de la température calculée analytiquement et de celle simulée par le modèle en différents points de la paroi. Le modèle est alors considéré valide si l'écart entre la température prédite et la température calculée analytiquement est « faible ».

Pour des sollicitations extérieures, de type sinusoïdal ou de type échelon, la forme de la diffusion de chaleur dans une paroi multi-couche est connue. Nous avons considéré séparément une évolution sinusoïdale de la température extérieure, représentative des variations de température extérieure sur un cycle journalier, et une augmentation instantanée de la température extérieure, représentatif d'une source de chaleur comme les apports solaires.

L'écart entre le modèle et la théorie est toujours inférieure à 2%, ce qui nous permet de valider ce modèle de conduction au sein d'un mur multicouches.

3.1.2.3 Echanges radiatifs

3.1.2.3.1 Propriétés radiatives des composants solides

Comme présenté dans la partie 1.3.1.1, le rayonnement est séparé selon les Courtes Longueurs d'Ondes CLO (0,25 μm à 2,5 μm) et les Grandes Longueurs d'Ondes GLO (2,5 μm à 100 μm). Le rayonnement solaire est considéré comme uniquement en CLO.

Pour déterminer les propriétés radiatives des matériaux, nous utilisons :

- Bilan d'énergie : la somme des coefficients d'absorption, de réflexion et de transmission est égale à 1.
- l'hypothèse du corps gris basée sur la loi du rayonnement de Kirchoff : le coefficient d'émissivité est égal au coefficient d'absorption en GLO.

Ainsi, à partir de la mesure de l'émissivité des matériaux en GLO présentée dans le chapitre 2, nous en déduisons le coefficient de réflexion en GLO. Les propriétés radiatives des matériaux utilisés sont celles fournies dans le tableau 2.2.

Il faut préciser que l'hypothèse de matériau diffusant trouve ses limites pour le métal déployé comme protection solaire. En effet, le matériau est de l'aluminium qui est un métal, l'émissivité spectrale dépend alors de la direction. L'absorptivité est bien différencié selon les CLO et les GLO. En effet, les métaux sont très réfléchissants dans les CLO et moins dans les GLO. N'ayant pu réaliser des mesures précises des propriétés radiatives du métal déployé, nous conserverons ces hypothèses mais gardons à l'esprit leurs limites.

3.1.2.3.2 Précision sur le rayonnement en CLO

3.1.2.3.2.1 *Le flux incident*

De par la position du capteur du rayonnement solaire, qui est à la verticale alignée sur le complexe (voir figure 2.11), c'est le flux solaire incident sur le système qui est relevé. La part réfléchie de ce flux incident par l'environnement est ainsi intégrée.

Le capteur utilisé mesure un flux incident sur la bande passante de 0,4 à 1,1 μm , alors que la bande CLO considérée s'étend jusqu'à 2,5 μm . Le flux incident CLO est obtenu par extrapolation de cette mesure. Ceci est effectué à partir d'un graphe de répartition du flux solaire à l'altitude de la mer. Ce dernier permet de déterminer le flux total de 0 à 2,5 μm ainsi que celui correspondant à la bande 0,4 à 1,1 μm . Le rapport du premier sur le deuxième est calculé et vaut approximativement 1,38.

Nous utilisons donc ce coefficient multiplicateur pour transformer la mesure réalisée en le flux incident sur la toute la bande CLO considérée.

3.1.2.3.2.2 *La prise en compte du phénomène de multi-réflexion*

Dans le cas d'une protection semi transparente, les phénomènes de multiréflexion prenant place entre la face externe du Mur M_o et la face interne de la Protection solaire P_i sont pris en compte tel que présenté dans l'équation E 1.1 du chapitre 1.

3.1.2.3.3 Précisions sur le rayonnement en GLO

3.1.2.3.3.1 Echange radiatif entre les deux faces délimitant la lame d'air

L'échange entre les deux surfaces se faisant face de part et d'autre de la lame d'air est écrit selon E 1.2 du chapitre 1. La hauteur étant très élevée par rapport à son épaisseur, l'approximation de surfaces parallèles infinies en parfait vis-à-vis est retenue, et ainsi le facteur de forme est égal à 1.

3.1.2.3.3.2 Echange radiatif entre EPLM et EXT

La densité de flux net en GLO sur la surface externe du complexe EPLM au point P_o , s'écrit :

$$\varphi_{GLO\ ext-P_o} = \alpha_{P_o} (\varepsilon_{ENV} \sigma F T_{ext}^4 + \sigma (1 - F) T_{ciel}^4) - \varepsilon_{P_o} \sigma T_{P_o}^4$$

Nous linéarisons ce bilan comme présenté au paragraphe 1.3.1.4, pour obtenir :

$$\varphi_{GLO\ ext-P_o} = h_{GLO,ciel} * (T_{ciel} - T_{P_o}) + h_{GLO,ENV} * (T_{ext} - T_{P_o}) \quad (E\ 3.2)$$

En considérant $\varepsilon_{ENV}=1$, et $\alpha_{P_o} = \varepsilon_{P_o}$,

$$h_{GLO,ciel} = \varepsilon_{P_o} \sigma (1 - F) (T_{ciel}^2 + T_{P_o}^2) (T_{ciel} + T_{P_o})$$
$$h_{GLO,ENV} = \varepsilon_{P_o} \sigma F (T_{ENV}^2 + T_{P_o}^2) (T_{ENV} + T_{P_o})$$

Sont considérées ci-dessus deux origines de rayonnement extérieur GLO différentes, le ciel et l'ENV. Pour l'ENV la température considérée est la température de l'air extérieur.

Le facteur de forme F entre la surface externe du complexe EPLM et le ciel est ici pris égal à 0,3. Ce rapport de forme correspond à la configuration de l'EPLM instrumenté présenté au chapitre 2.

La température de brillance de ciel est la température du ciel correspondant au flux GLO reçu. Elle peut donc être calculée à partir d'une mesure de ce flux GLO. Ne disposant pas de mesures, nous avons utilisé une corrélation expérimentale. On trouve dans la littérature de nombreuses expressions établies expérimentalement donnant le flux GLO en fonction de la température d'air extérieur. Nous les comparons ci-après afin de déterminer quelle expression nous retenons pour notre modélisation.

Duffie et Beckman (1974) proposent une loi exponentielle à partir de la température extérieure. Falk *et al.* (2013) utilisent différentes formules proposées par Hagetoft (2001) selon que le ciel est clair, partiellement nuageux ou nuageux.

Monteith et Unsworth (1991) utilisent une série de mesure de flux infrarouge du ciel et de températures mesurées pour établir une corrélation entre les deux. Hénon *et al.* (2011) fournissent des séries de mesure de température et de flux infrarouge effectuées au centre de la ville de Toulouse, à partir desquelles ils établissent une expression de température de brillance du ciel.

La figure 3.3 présente, à titre d'exemple, les résultats de ces différentes expressions pour une séquence de deux journées avec ciel clair pour lesquelles la température de l'air extérieur a été mesurée sur le site expérimental au cours du mois de juin 2012.

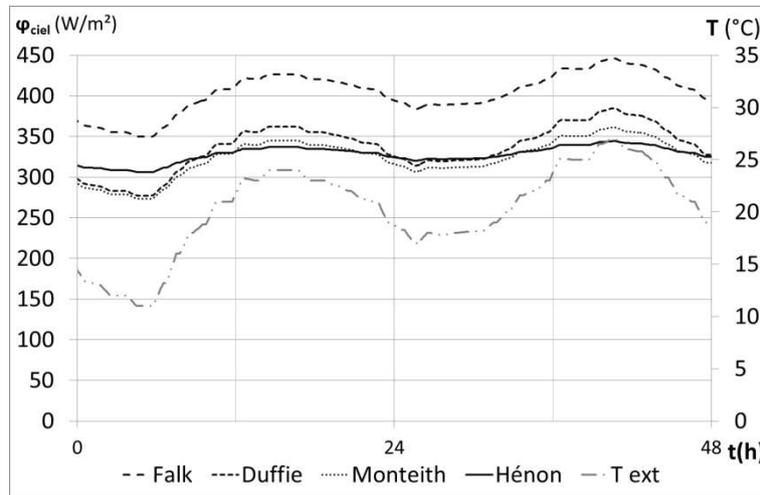


Figure 3.2 : Densité de flux de chaleur radiative en GLO incident en provenance du ciel. Tirets larges : d'après Falk *et al.* (2012), tirets serrés : d'après Duffie et Beckman (1974), pointillés : d'après Monteith et Unsworth (1991), ligne continue : d'après Hénon *et al.* (2011) et alternance tiret point : température d'air extérieure mesurée

Sur la figure 3.3, des variations significatives entre les différentes expressions apparaissent. N'ayant pas réalisé de mesures de flux radiatif en GLO nous ne pouvons pas vérifier la validité de ces modèles. Nous écartons la corrélation de Falk car trop différente des autres, et choisissons l'expression proposée par Duffie, qui s'écrit ainsi :

$$T_{ciel} = 0,0552T_{ext}^{1,5} \quad (E 3.3)$$

3.1.2.4 Echanges convectifs

Nous présentons ici les formes des échanges convectifs. Nous en distinguons trois :

- le transport convectif associé au renouvellement d'air de la lame d'air,
- un échange convectif forcé par le vent se fait avec l'air extérieur, sur la face externe de la protection solaire,
- les échanges entre la lame d'air et les faces la délimitant (face externe du Mur M_o et face interne de la Protection solaire P_i).

Les modèles de prédiction de l'écoulement dans la lame d'air sont présentés en détail au paragraphe 3.2.

3.1.2.4.1 Convection forcée entre la face externe de la protection solaire et l'air extérieur

Le vent extérieur induit un échange convectif entre la surface extérieure de la protection solaire et l'air extérieur. Le coefficient d'échange surfacique $h_{cv,ext}$ est fonction de la vitesse de vent et de la rugosité de la surface considérée. Nous reprenons l'expression donnée par McAdams (1994) et utilisée par différents auteurs (Ong (2003), Zalewski *et al.* (2002), Shen *et al.* (2007)). La densité de flux surfacique de l'échange convectif de la face externe de la protection solaire avec l'air extérieur s'écrit :

$$\varphi_{cv,P_o-ext} = h_{cv,ext} * (T_{ext} - T_{P_o}) \quad (E 3.4)$$

Avec

$$h_{cv,ext} = 5,7 + 3,8 * v_{ext}$$

3.1.2.4.2 Transport convectif dans la lame d'air

Le transport convectif est associé au renouvellement d'air dans la lame et est fonction du débit de renouvellement d'air.

Le bilan au centre de la lame d'air L_m fait intervenir des échanges de chaleur convectifs avec la face extérieure du mur $M_{o,m}$ d'une part, et la face interne de la protection solaire $P_{i,m}$ d'autre part ; ce bilan fait aussi intervenir le terme de chaleur évacuée par la lame d'air ϕ_{pertes} qui dépend du débit de renouvellement d'air.

Le terme de perte de chaleur ϕ_{pertes} (représenté sur la figure 3.4) dans le volume de la lame d'air, s'écrit comme la différence entre l'apport par l'entrée d'air en partie basse et la perte en partie haute. En considérant que la vitesse d'air est homogène sur la lame d'air, il s'écrit :

$$\phi_{pertes} = \dot{m}Cp_{air} * (T_{L_e} - T_{L_s}) \quad (E 3.5)$$

où T_{L_s} est la température à la sortie de la lame d'air et T_{L_e} est la température à l'entrée, qui est égale à la température extérieure.

Le débit massique \dot{m} s'écrit, en considérant que la vitesse d'air v est uniforme dans la section de la lame d'air, avec A qui est la section de passage de l'air :

$$\dot{m} = (v * A)\rho_{air}(\overline{T_L}) \quad (E 3.6)$$

Afin d'exprimer le flux ϕ_{pertes} en fonction de la température moyenne de lame d'air, nous utilisons une loi expérimentale présentée par Hirunlabh (1999) qui lie la température moyenne de la lame aux températures d'entrée et de sortie.

$$\overline{T_L} = \gamma T_{L_s} + (1 - \gamma)T_{L_e} \quad (E 3.7)$$

On obtient alors :

$$\phi_{pertes} = \frac{\dot{m}Cp_{air}}{\gamma} * (T_{ext} - \overline{T_L}) \quad (E 3.8)$$

Pour l'équation 3.7, Hirunlabh (1999) a estimé la valeur du coefficient pondérateur γ égale à 0,75 pour une configuration de mur Trombe.

3.1.2.4.3 Convection naturelle entre l'air de lame d'air et les faces délimitant la lame d'air

La densité de flux de chaleur entre la face interne de la protection solaire et la lame d'air s'écrit comme suit :

$$\varphi_{cv,P_i-L} = h_{cv,la}(T_{L_m} - T_{P_{i,m}}) \quad (E 3.9)$$

où $h_{cv,la}$ est le coefficient de convection entre l'air et cette face interne.

La densité de flux de chaleur entre la face externe du mur et l'air prend la même forme :

$$\varphi_{cv,P_i-L} = h_{cv,la}(T_{Lm} - T_{M_{o,m}}) \quad (E 3.10)$$

Dans l'équation précédente le coefficient de convection $h_{cv,la}$ est identique à celui présent dans l'équation 3.9.

3.1.2.5 Ecriture des bilans en différents points d'EPLM

La forme des flux convectifs, conductifs et radiatifs a été présentée dans le paragraphe précédent. Nous utilisons ces formes pour écrire les bilans d'énergie sur chaque maille d'EPLM. Nous distinguons quatre types de bilan, et pour chacun nous présentons un exemple en détail. Ainsi de l'extérieur vers l'intérieur, nous présentons les bilans aux points suivants :

- sur la face externe de la Protection solaire
- à l'interface entre la Protection solaire et l'air
- sur le volume de la Lamme d'air
- sur le volume d'air de la zone intérieure du bâtiment derrière l'EPLM

3.1.2.5.1 Bilan sur la face externe de la protection solaire

La figure 3.3 représente les échanges de chaleur prenant place au niveau de la face externe de la protection solaire. Ce sont ainsi :

- le flux solaire incident en CLO
- le flux en GLO d'échange avec le ciel et le flux en GLO d'échange avec l'ENV, (cf équation E 3.2)
- le flux convectif forcé par le vent extérieur, (cf équation E 3.4)
- le flux conductif dans l'épaisseur de la protection solaire

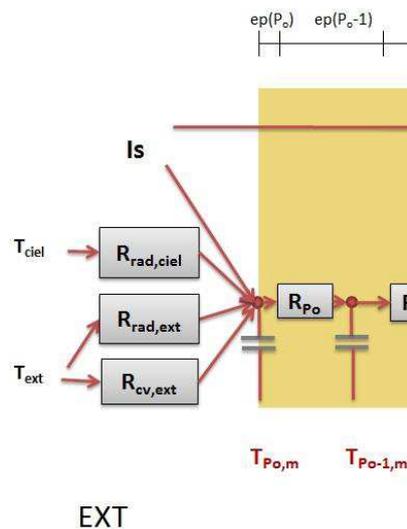


Figure 3.3 : Représentation des échanges au niveau de la face externe de la Protection solaire

Le bilan sur la face externe de la Protection solaire s'écrit :

$$V_{P_o} \rho_P C_P \frac{dT_{P_o,m}}{dt} = S_{EPML} \left[I_s + h_{cv,ext}(T_{ext} - T_{P_o,m}) + h_{GLO,ciel}(T_{ciel} - T_{P_o}) \right. \\ \left. + h_{GLO,ENV}(T_{ext} - T_{P_o}) + \frac{\lambda_p}{ep(P_o)}(T_{P_o,m-1} - T_{P_o,m}) \right] \quad (E 3.11)$$

3.1.2.5.2 Bilan à l'interface protection solaire air

La figure 3.4 représente les échanges prenant place au niveau de la lame d'air. Ainsi nous présentons les bilan aux points $P_{i,m}$, et L_m représentés sur ce schéma.

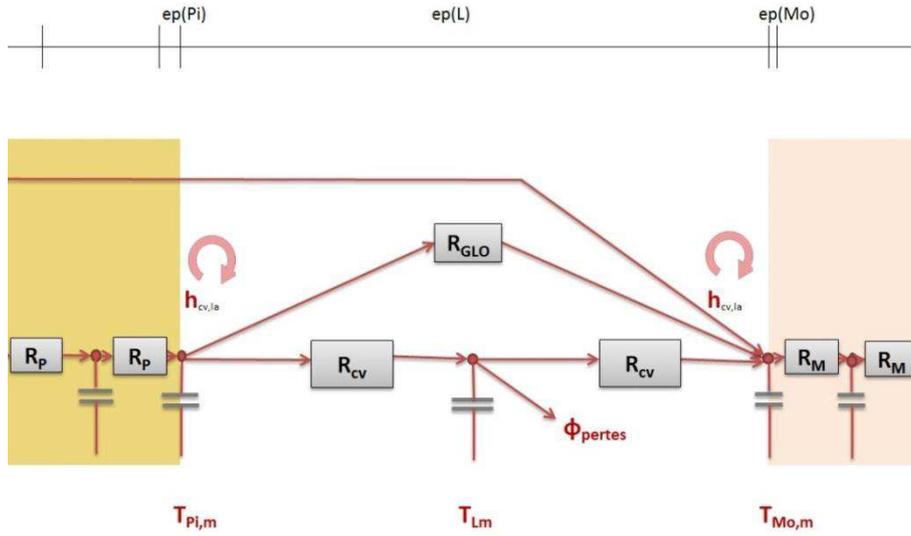


Figure 3.4 : Représentation des échanges au niveau de la lame d'air

L'écriture du bilan d'énergie à l'interface entre la protection solaire et la lame d'air fait intervenir l'échange convectif avec la lame d'air, l'échange radiatif avec la face externe du mur, et la conduction dans la protection solaire.

Dans le cas d'une transparence de la protection solaire, la densité de flux en CLO s'écrit en utilisant l'écriture développée de la multi-réflexion (cf équation E 1.1) :

$$\varphi_{CLO,soleil-P_i} = \frac{\alpha_{P_i,CLO} \rho_{M_o,CLO} \tau_{P_i,CLO}}{1 - \rho_{M_o,CLO} \rho_{P_i,CLO}} * I_s \quad (E 3.12)$$

La densité de flux en GLO entre la face interne de la protection solaire et la face externe du mur s'écrit :

$$\varphi_{GLO,M_o,m-P_{i,m}} = h_{GLO,la} * (T_{M_o,m} - T_{P_{i,m}}) \quad (E 3.13)$$

avec

$$h_{GLO,la} = \sigma (T_{M_o,m}^2 + T_{P_{i,m}}^2) (T_{P_{i,m}} + T_{M_o,m}) / \left(\frac{1}{\varepsilon_{P_i}} + \frac{1}{\varepsilon_{M_o}} - 1 \right)$$

La densité de flux convectif entre la face interne de la protection solaire et l'air de la lame d'air s'écrit selon l'équation (E 3.9).

Le bilan d'énergie sur la face interne de la protection solaire $P_{i,m}$ s'écrit:

$$V_P \rho_P C_{pP} \frac{dT_{P_{i,m}}}{dt} = S_{EPML} \left[h_{cv,la} (T_{L_m} - T_{P_{i,m}}) + h_{GLO,la} (T_{M_{o,m}} - T_{P_{i,m}}) + \frac{\lambda_P}{ep(P_i)} (T_{P_{i,m-1}} - T_{P_{i,m}}) + \frac{\alpha_{P_i,CLO} \rho_{M_{o,CLO}} \tau_{P_i,CLO}}{1 - \rho_{M_{o,CLO}} \rho_{P_i,CLO}} * I_s \right] \quad (E 3.14)$$

3.1.2.5.3 Bilan dans la lame d'air

Le nœud correspondant au bilan de la lame d'air est représenté sur la figure 3.4, c'est le point L_m . Ce bilan fait intervenir le flux de transport convectif, ainsi que le flux convectif entre les surfaces délimitant la lame d'air et cette lame d'air.

Ainsi, en utilisant les formes de ces flux déjà établis : l'équation E 3.8 pour le transport convectif et les équations E 3.9 et E 3.10 pour les flux convectifs à la surface, le bilan d'énergie au point L_m s'écrit :

$$V_L \rho_{air} C_{p_{air}} \frac{dT_{L_m}}{dt} = h_{cv,la} S_{EPML} (T_{P_{i,m}} - T_{L_m}) + h_{cv,la} S_{EPML} (T_{M_{o,m}} - T_{L_m}) + \frac{\dot{m} C_{p_{air}}}{\gamma} (T_{ext} - \bar{T}_L) \quad (E 3.15)$$

Les méthodes de détermination de la vitesse d'écoulement de l'air v (et donc du débit massique \dot{m}) et du coefficient de convection $h_{cv,la}$ sont présentées au paragraphe 3.2.

3.1.2.5.4 Bilan sur la zone intérieure du bâtiment

Le bilan d'énergie sur la zone intérieure du bâtiment fait intervenir l'échange entre la face interne du complexe EPLM et l'air de cette zone, ainsi que les possibles termes de puissance associés au chauffage He ou au rafraîchissement Co de cette zone.

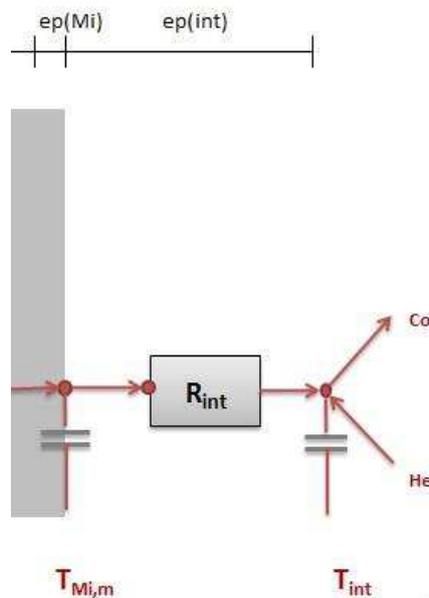


Figure 3.5 : Représentation des échanges au nœud intérieur de la zone intérieure

Ainsi le bilan d'énergie sur la zone intérieure s'écrit :

$$V_{int}\rho_{air}Cp_{air}\frac{dT_{int}}{dt} = S_{EPML}h_{int}(T_{M_{i,m}} - T_{int}) + He - Co \quad (E 3.16)$$

3.1.3 Ecriture générale des bilans

3.1.3.1 Système d'équations différentielles

La modélisation complète des transferts dans l'EPLM et son environnement extérieur et intérieur comprend 24 nœuds. A chaque nœud, un bilan d'énergie est écrit sous une des 4 formes présentées dans le paragraphe précédent 3.1.2.5. Les inconnues sont les températures en chaque nœud, soit 24 inconnues. Nous avons donc un système de 24 équations pour autant d'inconnues.

Tous les bilans conduisent à des équations différentielles du premier ordre dont les coefficients ne sont pas tous constants. Les coefficients constants sont :

- Les résistances thermiques associées à la conduction
- Les coefficients associés aux flux radiatifs en CLO

Les coefficients non constants sont :

- Les coefficients d'échanges convectifs, qui dépendent de l'écoulement
- Les coefficients d'échanges radiatifs en GLO, qui dépendent des températures de surface
- Le coefficient correspondant au transport convectif, qui dépend du débit de renouvellement d'air

3.1.3.2 Ecriture matricielle

Nous pouvons ainsi écrire une forme généralisée des bilans de chaleur écrits aux nœuds du modèle. Pour tout nœud k du maillage, le bilan est de la forme :

$$C_k \frac{dT_k}{dt} = \sum_{i=1}^n a_{k,i} T_i + b_{k,ext} T_{ext} + b_{k,ciel} T_{ciel} + b_{k,s} I_s + He - Co \quad (E 3.17)$$

où C_k est la masse thermique du nœud k ,

et a et b des coefficients d'échanges thermiques.

En introduisant une écriture matricielle, les bilans peuvent prendre une forme simplifiée :

$$C \frac{dT}{dt} = A * T + B * U \quad (E 3.18)$$

où

- C la matrice des capacités, diagonale de dimension $n*n$
- A matrice des transferts d'origines internes, de dimension $n*n$
- B matrice des transferts d'origines externes, de dimension $5*n$
- U matrice des sollicitations extérieures et intérieures, de dimension $5*1$

En écrivant sous forme développée, on a :

$$\begin{pmatrix} c_{1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{2,2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{n-1,n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{n,n} \end{pmatrix} * \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_{n-1} \\ T_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & a_{n-1,3} & \dots & a_{n-1,n-1} & a_{n-1,n} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n,n-1} & a_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_{n-1} \\ T_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{1,1} & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n-1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{n,1} & b_{n,2} & b_{n,2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_s \\ T_{ext} \\ T_{ciel} \\ He \\ Co \end{pmatrix}$$

où He et Co sont les possibles charges de chauffage et de rafraichissement associées à la zone thermique intérieure du bâtiment située derrière le système EPLM.

3.1.4 Résolution

3.1.4.1 Choix du schéma de résolution

Les équations présentées dans la partie précédente peuvent être résolues en utilisant la méthode d'Euler en utilisant différents schémas de résolution : explicite, implicite et de Crank-Nicolson. Ces schémas peuvent être classés suivant leur stabilité (du moins stable au plus stable), leur rapidité de calcul, et la précision des résultats (du moins pertinent au plus pertinent).

Schéma explicite

A chaque pas de temps, les températures sont calculées à partir des valeurs au pas de temps précédent. Ce schéma présente l'avantage de la rapidité de calcul, mais l'inconvénient de l'instabilité (les températures calculées peuvent rapidement diverger). La précision du calcul est de l'ordre de dt .

Schéma implicite

Les températures à un instant t sont calculées par inversion de matrice. L'erreur est également de l'ordre de dt . Le temps de calcul associé est plus long que pour le schéma explicite du fait de l'inversion de matrice.

Schéma centré (ou de Crank-Nicolson)

Pour ce schéma, on se base sur la valeur moyennée des températures à (t) et $(t+dt)$. Un développement limité permet de montrer que l'erreur est de l'ordre de dt^2 . Ce dernier schéma est, a priori, plus coûteux en temps de calcul, mais il est également plus précis et plus stable que les précédents.

Le schéma de résolution centré est retenu pour le modèle, parce que la résolution reste rapide et ce schéma offre le plus de précision.

En reprenant l'équation matricielle des bilans de chaleur (E 3.17), on peut écrire avec la méthode d'Euler, pour un pas de temps t , en fonction du pas de temps précédent $t-dt$:

$$T(t) - T(t - dt) = C^{-1}A \frac{T(t) + T(t - dt)}{2} \cdot dt + C^{-1}BU(t)dt$$

Soit, en notant I la matrice identité,

$$\left(I - \frac{C^{-1}A dt}{2}\right) T(t) = \left(I + \frac{C^{-1}A dt}{2}\right) T(t - dt) + C^{-1}B * U(t) dt$$

ceci permet d'obtenir une expression de T(t) :

$$T(t) = \left(I - \frac{C^{-1}A dt}{2}\right)^{-1} \left(\left(I + \frac{C^{-1}A dt}{2}\right) T(t - dt) + C^{-1}B U(t) dt \right) \quad (E 3.19)$$

3.1.4.2 Algorithme de calcul

La résolution de l'équation différentielle se fait en utilisant le schéma centré. Les matrices de coefficients d'échanges thermiques A et B n'étant pas constant, il faut les recalculer à chaque pas de temps.

Nous présentons ici l'algorithme de calcul utilisé avec t qui est le temps, dt le pas de temps, et k un indice d'itération.

1. Initialisation des données :
 - chargement des données extérieures et construction des matrices de transfert
2. Pour chaque pas de temps t ,
 - Initialisation ($k=0$)
 - Construction des matrices de transfert : les coefficients d'échanges thermiques non constants sont calculés à partir des données du pas de temps précédent ($t-dt$). Calcul de la vitesse d'écoulement et du coefficient de convection associé selon modèle choisi. --> A_0 et B_0
 - Résolution par la méthode du schéma centré avec matrices de transfert (A_0 et B_0). --> Températures au temps t , $T_0(t)$
 - Itération sur k du calcul jusqu'à convergence :
 - Construction des matrices de transfert : les coefficients d'échanges thermiques non constants sont calculés à partir des données de l'itération précédente ($k-1$). Calcul de la vitesse d'écoulement et du coefficient de convection associé selon modèle choisi. --> A_k et B_k
 - Résolution par la méthode du schéma centré avec matrices de transfert (A_k et B_k) --> Températures au temps t , $T_k(t)$
 - Vérification de la convergence
 - si $\|T_k(t) - T_{k-1}(t)\| < \varrho$, on passe au pas de temps suivant
 - si $\|T_k(t) - T_{k-1}(t)\| > \varrho$, pas de calcul supplémentaire

3.2 Présentation des modèles de détermination de la vitesse d'écoulement dans la lame d'air

Dans le chapitre 1, nous avons identifié 3 types de modèles de prédiction de l'écoulement dans la lame d'air. Nous présentons ici comment les intégrer dans la modélisation adoptée, et discutons leurs pertinences a priori. Nous considérons l'approche CFD de Gan (2011), l'approche par « effet cheminée » de Ong (2003), puis l'approche normative par le calcul des pertes de charge.

3.2.1 Approche CFD de Gan

3.2.1.1 Présentation

Nous considérons l'étude de Gan (2011) qui a pour objectif d'établir des expressions générales du débit de renouvellement d'air et du coefficient de convection associé dans une lame ouverte chauffée asymétriquement. Le cas d'application étudié est la configuration d'une façade double peau en mode Out-Out (cf figure 1.1).

Le champ d'application est celui des cavités avec une hauteur comprise entre 1 et 6m, et une épaisseur de lame d'air de 0,05 à 0,6m, et pour des densité de flux induisant l'écoulement compris entre 100 et 1000W/m².

La figure 3.6 représente la configuration étudiée. Les densités de flux de chaleur aux deux faces de la lame d'air sont imposées, et sont nommés q_1 et q_2 , elles sont toujours positives. q_r est alors le rapport de densité de flux adimensionnelle, défini par :

$$q_r = \frac{q_2}{q_1 + q_2}$$

Deux géométries sont considérées pour l'entrée d'air : une entrée droite, et une entrée en coude. Le domaine d'étude CFD est la lame d'air, ainsi qu'une extension « vers l'extérieur » d'une largeur correspondant à 10 fois l'épaisseur de lame d'air. A la limite de ce domaine d'étude CFD étendu, le champ de pression est imposé et uniforme. Les échanges radiatifs ne sont pas considérés.

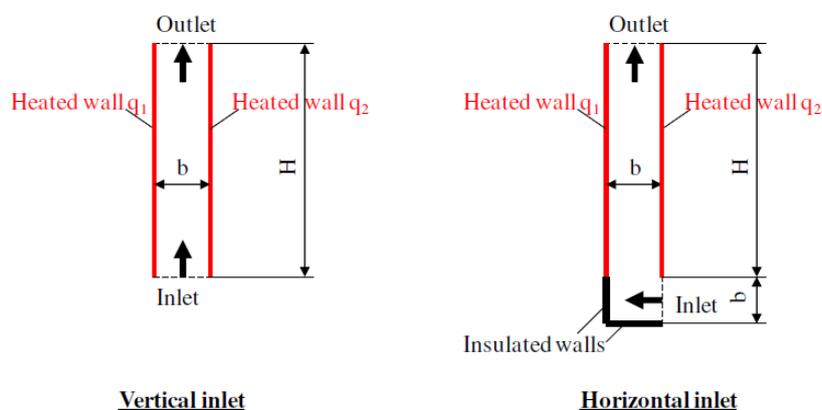


Figure 3.6 : Schéma des deux types de cavité considérés d'après Gan (2011). Les flux q_1 et q_2 apparaissent, et l'extérieur est à « droite ».

Les résultats sont obtenus en réalisant des simulations par CFD en régime permanent, en faisant varier les différents paramètres (rapport de forme, rapport des flux q_r) pour les deux configurations d'ouverture.

Les calculs CFD menés par cet auteur sont ensuite exploités de façon à fournir des corrélations de convection naturelle. Celle-ci s'exprime à partir des nombres de Rayleigh, de Reynolds, de Nusselt, du rapport de forme, du rapport de flux imposé aux bords de la lame d'air, et s'écrivent sous la forme suivante :

$$\begin{cases} Nu = c_1 \left[Ra_{e_{la}} * \left(\frac{H_{mur}}{e_{la}} \right)^{3/2} \right]^m \\ Re = \frac{(Nu/c_2)^{1/n}}{Ra_{e_{la}}^a} \end{cases} \quad (E 3.20)$$

où le nombre de Nusselt est défini par :

$$Nu = \frac{h_c * e_{la}}{\lambda_{air}} \quad (E 3.21)$$

le nombre de Rayleigh utilisé par l'auteur fait intervenir le rapport de forme et est défini par :

$$Ra_{e_{la}} = \frac{g \beta_{air} \rho_{air} \frac{q_1 + q_2}{2} e_{la}^4 e_{la}}{\mu d_{air} \lambda_{air} H} \quad (E 3.22)$$

et le nombre de Reynolds s'écrit :

$$Re = \frac{\rho_{air} e_{la} v}{\mu_{air}} \quad (E 3.23)$$

Dans les expressions (E 3.20) les coefficients c_1 , m , c_2 , a et n sont des polynômes dont les coefficients font intervenir en particulier le rapport des densités de flux q_r . Leurs expressions sont données dans des tables récapitulatives, que nous reproduisons en annexe 2.

La vitesse d'écoulement de l'air et le coefficient d'échange convectif se déduisent alors respectivement du nombre de Reynolds et du nombre de Nusselt calculés par l'équation (E 3.21).

L'auteur précise que les échanges radiatifs dans la lame d'air ne sont pas pris en compte. Or dans le cas de flux élevés et asymétriques, la part des échanges radiatifs n'est pas négligeable. C'est la situation que l'on trouve, quand la protection solaire est opaque, et que la lame d'air est alors très majoritairement chauffée par la face interne de la protection solaire. De manière à remédier à cet inconvénient, Gan (2011) propose de faire l'hypothèse que le flux à la limite sur la face interne de la protection solaire se « divise » de manière égale entre un flux d'échange convectif vers l'air, et un flux radiatif vers la face opposée, qui est alors la nouvelle densité de flux à la limite q_1 .

3.2.1.2 Utilisation de ce cette approche dans le modèle EPML

Les systèmes de protections solaires étudiés dans ce travail sont totalement ou partiellement opaques. La paroi par laquelle est chauffée la lame d'air correspond à la protection solaire et est située du même côté que l'entrée d'air. Pour des protections solaires opaques fonctionnant en mode *Out-Out* (cf figure 1.1), nous considérons les formules établies pour une entrée d'air en coude.

En utilisant la notation des flux utilisés par Gan, le flux conductif sur la couche limite de la Protection qui fait intervenir la température à l'interface protection solaire et air $T_{P_{i,m}}$ et la température au nœud adjacent dans la protection solaire $T_{P_{m,4}}$ s'écrit :

$$q_2 = \frac{T_{P_{o,m}} - T_{P_{m,4}}}{R}$$

D'autre part, nous appliquons l'approximation de la prise en compte de l'échange en GLO entre les deux faces de la cavité suggérée par Gan (2011). Cette hypothèse se traduit par :

$$q_1 = 0,5 * q_2$$

Ainsi, le rapport des flux est toujours égale à :

$$q_r = 2/3$$

3.2.1.3 Limite d'application

Comme précisé en 3.2.1.1, les flux moteurs doivent être supérieurs à 100 W/m², ceci correspond à des flux de chaleur absorbés dans une double peau. Pour une solution opaque comme un bardage bois relativement peu conducteur, le flux solaire incident est d'abord absorbé sur la surface extérieure, puis seule une part est conduite en son sein pour être donnée à la lame d'air ; ainsi, dans ce cas, le flux de chaleur donné à la lame d'air est largement inférieur à celui obtenu avec une paroi vitrée. Il faut donc s'assurer que celui-ci est de l'ordre de grandeur de 100 W/m², ce qui constitue une des limites d'application des résultats de Gan (2011).

Une autre des limites de ce type de modélisation est qu'elle ne s'applique qu'à la géométrie ici considérée. Ainsi le coude est tel que la section d'entrée est la même que la section d'écoulement, ce qui n'est pas le cas pour le complexe EPLM qui a une section d'écoulement nettement plus faible. Ce point constitue une des limites de ce type de famille de prédiction.

De la même façon, si une grille était positionnée au niveau de l'entrée basse de lame d'air, les conclusions de ce travail ne pourraient être utilisées.

3.2.2 Approches analytiques

Nous présentons ici les deux modèles analytiques qui permettent de déterminer la vitesse d'écoulement de l'air dans le canal par un calcul basé sur l'écriture des pressions à l'intérieur et à l'extérieur de la lame d'air. Le premier est celui par « effet cheminée » de Ong (2003), et le deuxième est l'approche normative par le calcul des pertes de charge. Ensuite, nous présentons comment calculer le coefficient de convection associé à ces mouvements de convection naturelle. Ce calcul est alors indépendant du calcul de la vitesse d'écoulement.

3.2.2.1 Détermination de la vitesse d'écoulement

3.2.2.1.1 Approche dite par effet cheminée, approche de Ong (2003)

Ong (2003) propose un modèle mathématique de cheminée solaire. Il utilise notamment la formule établie par Bansal *et al.* (1993), pour déterminer le débit de renouvellement d'air. Celle-ci a été précisée dans le paragraphe 1.3.2.3.1, et la vitesse ainsi calculée s'écrit :

$$v = C_d * \frac{S_e}{\sqrt{1 + \frac{S_e}{S_s}}} \sqrt{\frac{2gH(\overline{T}_{la} - T_{ext})}{T_{ext}}} \quad (E 3.24)$$

Le coefficient de décharge Cd est celui déterminé empiriquement par Florentzou *et al.* (1998) et a pour valeur 0,6. Il faut remarquer qu'il a été déterminé expérimentalement dans le cas de la ventilation naturelle par effet cheminée prenant place dans un bâtiment de 3 étages. Les entrées et sorties se faisant par des fenêtres ouvertes, et l'air circule dans le bâtiment, et en particulier la cage d'escalier. Les mesures températures ainsi que de vitesses d'écoulement ont permis de calculer ce coefficient de décharge. Cette détermination expérimentale de ce coefficient Cd dans une configuration particulière constitue une limite de l'utilisation du modèle de Ong (2003) dans un cas géométrique généralisé.

3.2.2.1.2 Approche par pertes de charge

3.2.2.1.2.1 Présentation

Cette méthode se centre sur la prise en compte de la forme de la cavité, et notamment de toutes les pertes de charge associées qui limitent l'écoulement. Concernant notre cas, EPLM, l'écoulement et les pertes de charges associées sont présentés sur la figure 3.7. Les pertes de charge singulières d'entrée et de sortie ainsi que les pertes de charge linéaires de friction apparaissent.

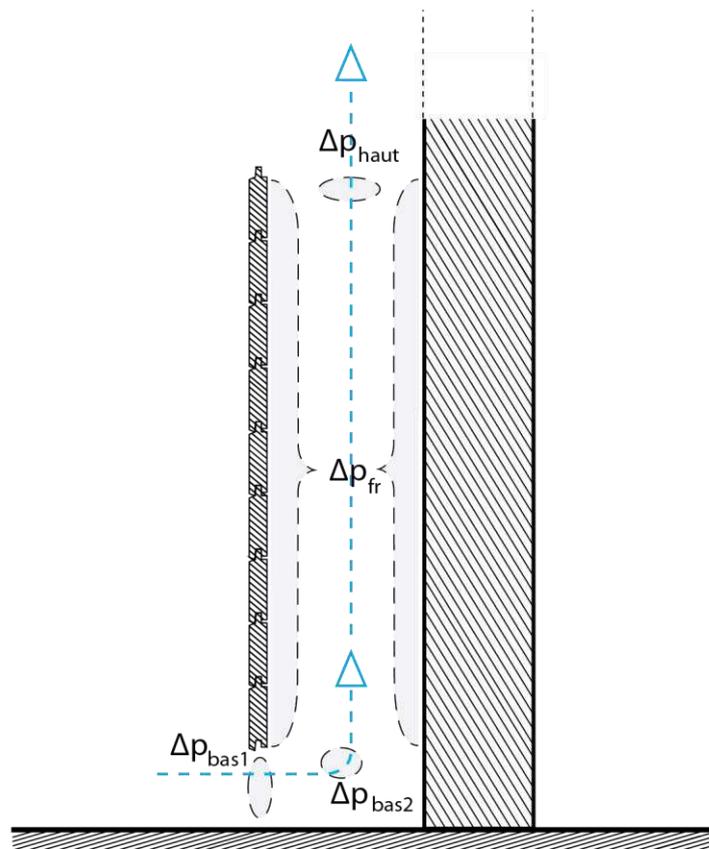


Figure 3.7 : Localisation des pertes de charge de l'écoulement vertical. Δp_{fr} est associée aux frottements, $\Delta p_{bas,1}$ associée à la réduction de section à l'entrée, $\Delta p_{bas,2}$ associée au coude, Δp_{haut} associée à la sortie

Ainsi la somme des pertes de charge de l'écoulement s'écrit :

$$\Delta p = \Delta p_{fr} + \Delta p_{bas,coude} + \Delta p_{bas,réduction} + \Delta p_{haut} \quad (E 3.25)$$

3.2.2.1.2.2 Détail du calcul des pertes de charge

Pertes de charge linéaire de friction

Les pertes de charge linéaires par friction Δp_{fr} sont estimées par la formule de Darcy-Weissbach. Ici pour un canal de section rectangulaire constante, où la longueur du petit côté e_{la} est très faible devant la longueur du grand côté, celle-ci s'écrit :

$$\Delta p_{fr} = \frac{KH}{2e_{la}} \frac{\rho v^2}{2}$$

Le coefficient de friction K dépend du type d'écoulement, et donc du nombre de Reynolds. A partir d'Idel'chik (1994), on peut distinguer dans notre cas trois régimes, et pour chacun une expression différente du coefficient de friction :

- Si le nombre de Reynolds, est inférieur à 2300, l'écoulement est laminaire et le coefficient de perte de charge linéaire peut être approximé par la loi de Hagen Poiseuille :

$$K = \frac{64}{Re}$$

- La plage du régime de transition dépend de la rugosité des parois entre lesquelles se fait l'écoulement. Ici, l'hypothèse est faite qu'elles sont à faible rugosité :
 - o Pour $Re \in [2300 ; 3550]$ $K = 5,8 * 10^{-5} * Re^{0,798}$
 - o Pour $Re \in [3550; 40000]$ $K = 0,3164/Re^{0,25}$
- Le troisième régime qui correspond à la turbulence de l'écoulement liée à la rugosité des parois, est caractérisé par le fait que le coefficient de perte de charge est indépendant du nombre de Reynolds : il n'est alors fonction que de la rugosité. Dans notre cas, de tels nombres de Reynolds ne sont pas atteints comme nous l'avons fait remarquer à l'occasion de l'analyse des données expérimentales dans le chapitre 2.

Pertes de charge singulière d'entrée et de sortie

Les pertes de charge singulières de l'écoulement pour une vitesse v , s'écrivent :

$$\Delta p = \xi \frac{\rho v^2}{2}$$

où ξ est le coefficient de perte de charge associé.

Le coefficient de perte de charge d'entrée peut être décomposé en deux coefficients. Le premier correspond au coude du passage d'un écoulement horizontal à un écoulement vertical, et le deuxième à une diminution de la section d'écoulement.

$$\Delta p_{bas} = \Delta p_{bas,coude} + \Delta p_{bas,réduction}$$

Les coefficients de perte de charge sont déterminés à partir d'Idel'chik (1994).

Le coefficient de perte de charge pour une réduction de section, d'un passage de section infinie à section perpendiculaire limitée est :

$$\xi_{bas,réduction} = 0,5$$

Le coefficient de perte de charge pour un coude simple de section carré est :

$$\xi_{bas,coude} = 1$$

Le coefficient de perte de charge pour la sortie libre d'un canal avec une répartition de vitesse uniforme est :

$$\xi_{haut,agrandissement} = 1$$

3.2.2.1.2.3 Les pressions motrices

Comme expliqué dans le chapitre 1, en régime permanent, la pression motrice entre l'air dans la lame d'air et l'air à l'extérieur est compensée par les pertes de charge de l'écoulement.

En faisant l'approximation d'un gaz parfait la pression motrice liée à la différence de température entre l'air de la lame d'air et l'air extérieur, l'expression proposée par la norme NF EN 13363 est la suivante :

$$\Delta p_{pm,T} = gH(\rho_{ext} - \rho_{lame}) = gH\rho_0 T_0 \left(\frac{1}{T_{ext}} - \frac{1}{T_{la}} \right) \quad (E 3.26)$$

Le vent extérieur affecte la pression extérieure. La pression extérieure en bas de l'EPLM et la pression extérieure en haut de l'EPLM sont ainsi modifiées, et ces modifications dépendent de la vitesse de vent extérieur et de sa direction. La variation de pression liée au vent s'écrit alors en introduisant des coefficients de pression bas et hauts, $C_{w,b}$ et $C_{w,h}$ qui dépendent de la direction du vent. La différence entre la pression extérieure en partie haute et la pression en partie basse due au vent s'écrit alors :

$$\Delta p_{pm,w} = C_{w,h} * \frac{\rho_{air} * v_{ext}^2}{2} - C_{w,b} * \frac{\rho_{air} * v_{ext}^2}{2}$$

La pression motrice associée à la vitesse de vent extérieur peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$\Delta p_{pm,w} = \Delta C_w * \frac{\rho_{air} * v_{ext}^2}{2} \quad (E 3.27)$$

Où $\Delta C_w = C_{w,h} - C_{w,b}$

ΔC_w est le coefficient de différence de pression extérieure. Il traduit notamment l'angle d'incidence du vent et la géométrie de l'entrée. Dans notre cas, nous utilisons le coefficient utilisé par Falk (2012) pour un bardage, et le considérons fixe. Le signe positif traduit que le vent fait face à la protection solaire.

$$\Delta C_w = 0,25$$

Cette différence de pression s'ajoute à la différence de pression liée à la différence de température pour constituer la différence de pression motrice totale

3.2.2.1.2.4 Détermination de la vitesse

La vitesse de l'écoulement s'obtient en égalisant la pression motrice avec la somme des pertes de charge de l'écoulement. Nous utilisons les expressions des pertes de charge établies au paragraphe 3.2.2.2 et la somme des pressions motrices dues à la différence de température E 3.23 et au vent E 3.24. Nous obtenons l'égalité suivante :

$$\Delta C_w * \frac{\rho_{air} * v_{ext}^2}{2} + gH\rho T_0 \left(\frac{1}{T_{ext}} - \frac{1}{\overline{T}_{la}} \right) = \left[\frac{KH}{2e_{la}} + \left(\sum_i \xi_i \right) \right] \frac{\rho_{air} v^2}{2} \quad (E 3.28)$$

Il faut remarquer que le coefficient de frottement K dépend du nombre de Reynolds et donc de la vitesse d'écoulement. L'expression de la vitesse est donc plus complexe et ne peut se faire de manière directe ; la résolution se fait alors par itération.

Les deux modèles analytiques permettent de déterminer la vitesse d'écoulement dans la lame d'air. Il faut préciser que cette vitesse correspond à une vitesse de renouvellement de l'air, c'est donc une vitesse moyenne sur la section, la vitesse indiquée sur la figure 1.9.

Cet écoulement ascendant induit un échange convectif entre l'air et le mur d'un côté et la protection solaire de l'autre. Nous présentons maintenant comment calculer le coefficient de convection.

3.2.2.2 Détermination du coefficient de convection pour ces deux approches

De nombreuses corrélations donnant le nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh pour un mouvement de convection naturel entre deux plaques existent dans la littérature. Ces corrélations sont issues de calculs de type CFD ou de mesures expérimentales. Corcione (2007) en recense un grand nombre et les compare. Il en conclut que les corrélations issues de calculs CFD sont en concordance alors que celles issues de mesures expérimentales peuvent grandement différer. Ici, nous comparons les résultats de 5 de ces corrélations dans le cas de la lame d'air de l'EPLM pour déterminer si elles donnent les mêmes résultats ou si elles diffèrent.

Pour étudier le renouvellement d'air en convection libre, c'est-à-dire le mouvement du fluide depuis l'extérieur vers l'intérieur, la différence de température motrice est la différence de température entre les parois de la lame d'air et l'air extérieur. Le nombre de Rayleigh sur la hauteur s'écrit alors :

$$Ra_H = Gr_H * Pr = \frac{g\beta\rho_{air}^2 H^3}{\mu^2} \left(\frac{T_{Mo} + T_{Pi}}{2} - T_{ext} \right) * Pr$$

Un certain nombre d'auteurs (Mc Adams (1994), Churchill et Chu (1975)) s'accordent à considérer que le régime turbulent est atteint quand le nombre de Rayleigh est supérieur à 10^9 . Nous avons vu d'après l'analyse des données expérimentales que selon cette considération, l'écoulement est entre le régime transitoire et le régime turbulent. Nous avons donc utilisé des corrélations établies pour un régime de convection naturelle entre deux plaques en régime turbulent. Leurs expressions sont les suivantes :

Churchill et Chu (1975) :

$$Nu = (0,825 + 0,387(RaH^{0,17})(1 + 0,67Pr^{-0,56})^{-0,3})^2$$

McAdams (1994) :

$$Nu = 0,13Ra^{1/3}$$

Fishenden et Saunders (1950) :

$$Nu = 0,107Gr^{1/3}$$

Alamdari et Hamond (1963) :

$$Nu = \left[(0,55Gr^{1/4})^6 + (0,095Gr^{1/3})^6 \right]^{1/6}$$

De Witt, utilisé par Ong (1999) :

$$Nu = \left(0,825 + (0,387Ra^{1/6}) / (1 + (0,492/Pr)^{9/16})^{8/27} \right)^2$$

Pour une lame d'air à une température ambiante de 20°C, et la géométrie ici étudiée : une hauteur de 2,5 m et une épaisseur de lame d'air de 0,033 m, nous comparons les prédictions de coefficient de convection des différentes corrélations, en fonction de la différence de température motrice (différence entre température moyenne de surface délimitant la paroi et température extérieure), qui est la différence entre la température extérieure et la température moyenne des surfaces délimitant la lame d'air.

Sur les figures 3.8 et 3.9 sont tracés respectivement le nombre de Grashof en fonction de la différence de température motrice, et les nombres de Nusselt déterminés à partir des différentes corrélations en fonction de la différence de température motrice.

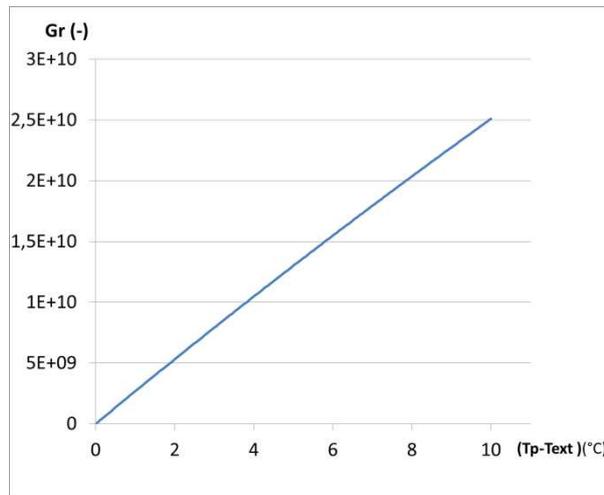


Figure 3.8 : Nombre de Grashof en fonction de la différence de température motrice

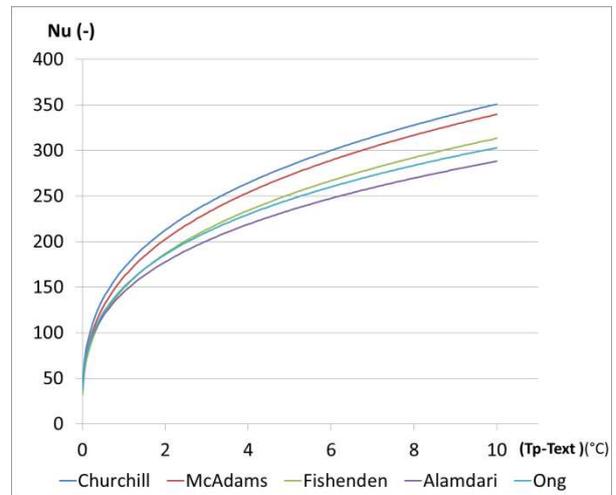


Figure 3.9 : Valeurs du nombre de Nusselt selon différentes corrélations. Bleu, Churchill et Chu (1975), rouge McAdams (1994), vert, Fishenden et Saunders (1950), violet, Alamdari et Hamond (1963), bleu ciel, De Witt, utilisé par Ong (2003)

Les valeurs du nombre de Grashof sur la figure 3.8 illustrent bien que l'écoulement est turbulent quand la différence de température est supérieure à 1°C. Les nombres de Nusselt dont se déduisent les coefficients de convection, calculés à partir des différentes corrélations sont proches. Nous utiliserons la corrélation proposée par Fishenden car étant la plus proche de la moyenne des 5. Ce choix est conforté par le fait que cette corrélation a été choisie par Zalewski *et al.* (1999) dans leur étude d'un SolarWall composite après avoir comparé le flux convectif ainsi calculé avec le flux convectif mesuré expérimentalement.

3.3 Post-traitement

3.3.1 Profil de températures aux trois hauteurs

L'objectif est ici de prendre en compte l'impact de l'écoulement vertical sur les transferts de chaleur dans le mur en calculant les profils de températures aux trois hauteurs considérées.

3.3.1.1 Profil vertical de température dans la lame d'air

Nous faisons l'hypothèse que le coefficient de convection est constant sur la hauteur de la lame d'air, et nous considérons des températures moyennes de surfaces latérales, c'est-à-dire de la face interne de la Protection solaire et de la face externe du Mur. Alors l'expression du profil vertical de température d'air dans la lame d'air s'obtient en intégrant un bilan énergétique écrit pour un volume élémentaire de hauteur dz et de base la section de passage de l'air dans la lame d'air.

Le bilan d'énergie s'écrit :

$$\frac{dT(z)}{dz} = \frac{1}{H_0} * (T_m - T(z)) \quad (\text{E 3.29})$$

où

$$H_0 = \frac{ve_{la}\rho_{air}Cp}{2h_{cv,la}}$$

et

$$T_m = \frac{T_{Pi} + T_{Mo}}{2}$$

A cette équation est associée la condition à la limite suivante, $T(z = 0) = T_{ext}$, la résolution de cette équation différentielle donne :

$$T(z) = T_m - (T_m - T_{ext})\exp\left(-\frac{z}{H_0}\right) \quad (\text{E 3.30})$$

La température de sortie de l'air est donc :

$$T_{air,s} = T_m - (T_m - T_{ext})\exp\left(-\frac{H}{H_0}\right)$$

La température moyenne dans la lame d'air est quant à elle:

$$\bar{T}_L = \frac{1}{H} \int_0^H \left(T_m - (T_m - T_{ext})\exp\left(-\frac{z}{H_0}\right) \right) dz = T_m - \frac{H}{H_0} (T_{L,s} - T_{L,e})$$

3.3.1.2 Ecriture des profils aux hauteurs basse et haute

A partir du profil vertical de température d'air dans la lame d'air et du coefficient de convection, il est alors possible de calculer les profils de températures dans le mur aux hauteurs basse z_b , et haute z_n , là où sont placés les thermocouples.

Pour cela, on considère comme conditions extérieures la température dans la lame d'air à la hauteur correspondante, le coefficient de convection calculé pour la lame d'air et pour le flux radiatif, celui calculé pour la température moyenne de la face interne de la protection solaire

3.3.2 Calcul du facteur de transmission solaire

Un des objectifs est d'utiliser le modèle EPLM pour calculer le facteur de transmission solaire de la protection solaire. Nous présentons d'abord comment le facteur de transmission solaire est défini dans les documents normatifs, puis les méthodes de calculs normées. Ensuite, nous utilisons la méthodologie de Hellstrom *et al.* (2007) pour calculer le facteur de transmission solaire de la protection solaire à partir du modèle EPLM.

3.3.2.1 Définition du facteur de transmission solaire

Le facteur de transmission solaire d'un élément de paroi est la fraction transmise de l'énergie solaire incidente. Il est défini dans la norme EN ISO 9288 :1989. Il comprend alors les différents types de transfert (radiatif, conductif, convectif) au sein de l'élément caractérisé. Ainsi la norme NF EN 13363-2 « Dispositif de protection solaire combiné à des vitrages, calcul du facteur de transmission solaire et lumineuse », distingue 4 composantes :

- ϕ_{CLO} flux directement transmis, il correspond au rayonnement en CLO
- ϕ_{GLO} flux associé au rayonnement GLO
- ϕ_{cv} flux associé à l'échange convectif
- ϕ_v flux de transport convectif associé à la ventilation, s'il y a échange d'air

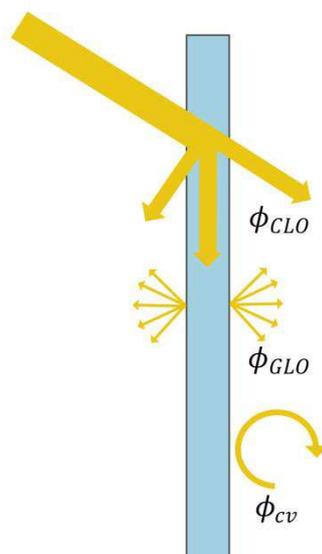


Figure 3.10 : Schéma illustrant les composantes du facteur de transmission solaire

Ainsi défini, le facteur de transmission solaire peut se calculer de la façon suivante :

$$f_s = \frac{\phi_{CLO} + \phi_{GLO} + \phi_{cv} + \phi_v}{S_{EPLM} * I_S} \quad (E 3.31)$$

3.3.2.2 Calcul du facteur de transmission solaire d'un ou plusieurs éléments : approche normative

Le facteur de transmission solaire ne traduit que les échanges associés à la sollicitation radiative en CLO. Or, aussi bien dans les modélisations comme celle présentée pour l'EPLM que pour les mesures effectuées, il n'est pas possible d'uniquement considérer cette sollicitation. Il faut donc isoler les transferts de chaleur associés aux sollicitations radiatives en CLO, des transferts associés aux variations des sollicitations extérieures de type convectives et conductives.

La norme NF EN 13363-2 propose une méthode basée sur deux calculs distincts qui doivent être réalisés. Le premier se fait en considérant le rayonnement solaire incident en CLO, et pour le second celui-ci est considéré comme étant nul. Dans les deux cas, les 4 termes composant le facteur de transmission solaire sont calculés. Pour chaque terme, la différence entre le cas avec et sans rayonnement solaire incident en CLO correspond à la part uniquement associée au rayonnement solaire incident. Ce sont ces valeurs qui permettent de calculer le facteur de transmission solaire.

Ainsi, en adoptant cette méthode, le facteur de transmission solaire s'écrit :

$$f_s = \frac{(\phi_{CLO} + \phi_{GLO} + \phi_{cv} + \phi_v)_1 - (\phi_{CLO} + \phi_{GLO} + \phi_{cv} + \phi_v)_0}{S * I_S} \quad (E 3.32)$$

où les indices 1 et 0 correspondent aux résultats des simulations avec rayonnement solaire incident et sans rayonnement respectivement.

De par sa définition, dans le cas de plusieurs protections solaires mises en série, le facteur solaire de l'ensemble des protections solaires est le produit de leurs facteurs solaires. Ainsi, pour une paroi munie d'une protection solaire, le facteur solaire total est le produit du facteur solaire de la paroi par celui de la protection solaire.

Dans notre cas EPLM peut se décomposer en deux éléments distincts. Le premier correspond à la protection solaire et la lame d'air, et le deuxième est le mur. Ainsi, le facteur solaire total de l'EPLM peut s'écrire :

$$f_{sEPLM} = f_{sPL} * f_{sM} \quad (E 3.33)$$

3.3.2.3 Calcul du facteur de transmission solaire : méthode de Hellstrom et al. (2007)

Hellstrom *et al.* (2007) ont développé le logiciel PARASOL qui permet de calculer le facteur solaire d'un certain nombre de protections solaires dans différentes configurations. Leur méthode de calcul peut être qualifiée de indirect. En effet, une zone thermique associée à la paroi accueillant la protection solaire est considérée, les thermostats haut et bas sont fixés à 20°C, toutes les parois sont adiabatiques sauf celle considérée, il n'y a pas d'inertie intérieure. Ainsi les puissances de chaud et froid calculées correspondent à la compensation du flux de chaleur total transmis par la paroi muni

de la protection solaire. Et on peut alors calculer le facteur solaire total de la paroi munie de la protection solaire :

$$f_s = \frac{(Co - He)_1 - (Co - He)_0}{S * I_s} \quad (E 3.34)$$

1 : simulation avec rayonnement solaire incident

0 : simulation sans rayonnement solaire incident

I_s : rayonnement incident

He : charge pour chauffer

Co : charge pour rafraichir

L'objectif est d'utiliser le modèle EPLM pour calculer le facteur de transmission solaire de la protection solaire. La possibilité de définir des thermostats hauts et bas et de déterminer les charges de chaud et froid associés ont été intégrés dans le modèle EPLM présenté en amont (cf équation 3.17). Un autre développement a conduit à la possibilité de considérer seulement le Mur, sans la lame d'air et la protection solaire.

La méthode de calcul du facteur solaire de la protection solaire est la suivante. Nous considérons une protection solaire pour une journée ensoleillée donnée. Les thermostats de température intérieure sont fixés à 20°C. Nous réalisons 4 simulations, pour lesquelles les charges de chauffage et de rafraichissement sont enregistrées :

- Simulation EPLM avec prise en compte rayonnement
- Simulation EPLM sans prise en compte du rayonnement
- Simulation M avec prise en compte du rayonnement
- Simulation M sans prise en compte du rayonnement.

Les deux premières simulations permettent de calculer le facteur solaire d'EPLM, et les deux suivantes le facteur solaire du mur. Nous obtenons alors le facteur solaire de la protection solaire à partir de E 3.33.

3.3.2.4 Limites et ouvertures

La norme définissant le calcul du facteur de transmission NF EN 13363-2 propose une méthode basée sur un calcul en régime permanent, ce qui n'est pas le cas dans la modélisation d'EPLM ici présentée. Nous réalisons ainsi le calcul sur une journée et le facteur solaire calculé, est le facteur de transmission solaire moyen sur la journée.

Il faut aussi remarquer que le facteur solaire ici calculé dépend du flux solaire incident, il est donc propre aux sollicitations extérieures, et ici en particulier au fait que l'orientation considérée est sud.

Il faut cependant remarquer que la méthode proposée est plus réaliste que la méthode normative. En effet, elle permet de considérer un plus grand nombre de sollicitations extérieures en régime dynamique, et ainsi de mettre en avant les différences de comportement de protections solaires selon les possibles orientations, mais aussi selon le type de journées : ensoleillée ou non, chaude ou non par exemple.

3.3.3 Efficacité de la protection solaire

L'efficacité d'un système solaire passif de façade dépend de sa fonction. Ainsi, l'objectif des systèmes de type In-In ou Out-In, est d'assurer le chauffage de la zone intérieure, et donc de maximiser le flux de chaleur par convection donné à la zone intérieure. De la même façon, pour les systèmes de type In-Out, l'objectif est l'évacuation de la chaleur de la zone intérieure associée. Là encore, il s'agit de maximiser le flux de chaleur par convection.

Ainsi, par extension, nous considérons la même définition pour l'efficacité de la configuration Out-Out. En régime dynamique, l'efficacité instantanée n'a pas de sens, car elle peut être supérieure à 1. Nous considérons donc une période donnée, et l'efficacité est le rapport entre la chaleur totale évacuée et la chaleur totale incidente, et s'écrit ainsi :

$$\eta_P = \int_t \frac{\phi_v(t)}{S * I_s(t)} dt \quad (E 3.35)$$

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle EPLM développé. Celui-ci se base sur des approches de modélisations issues de la littérature. Pour le mouvement de convection dans la lame d'air, sont utilisés le débit de renouvellement d'air et le coefficient de convection qui sont fournis par des modèles de prédiction de l'écoulement. Nous avons intégré dans notre code de calcul trois types de modèles de prédiction de l'écoulement, le premier est celui proposé par Gan (2011), basé sur des calculs CFD. Le second dit « par effet cheminée », reprend la description de Ong (2003). Le troisième s'appuie sur le calcul des pertes de charge, comme le fait notamment la norme EN 13363. Les pertinences de ces approches de modélisations seront discutées à partir des données mesurées, dans le chapitre 4.

Chapitre 4 :

Qualification expérimentale du modèle

4.1 Introduction

Dans le chapitre 2, les séquences de mesures et les résultats expérimentaux obtenus ont été présentés. L'analyse de ces mesures a notamment guidé les choix de modélisation décrits dans le chapitre 3, en particulier ceux concernant les modélisations de l'écoulement dans la lame d'air et des échanges convectifs entre cet air et les parois le confinant. Ce travail nous a ainsi permis de mettre en place une modélisation des échanges de chaleur internes à l'EPML et entre l'EPLM et son environnement. Trois types d'approches de modélisation de l'écoulement dans la lame d'air – caractérisée par la vitesse d'écoulement et le coefficient de convection associé – ont été identifiés. Ceux-ci sont :

- l'approche par calcul CFD de Gan (2011) (cf paragraphe 3.2.1), dénommée ci-après approche « Gan »
- l'approche par effet cheminée d'Ong (2003) (cf paragraphe 3.2.2.1.1) dénommée ci-après approche « Ong »
- l'approche par pertes de charges (cf paragraphe 3.2.2.1.2), dénommée ci-après approche « PdC »

Dans ce chapitre, nous utilisons le modèle présenté au chapitre 3 et présentons les résultats d'un certain nombre de simulations numériques. L'objectif est notamment la discussion de la pertinence des trois approches de modélisation de l'écoulement rappelées ci-dessus. Dans un deuxième temps, il va s'agir de calculer les facteurs solaires des protections solaires ici étudiées (bardage brut-clair, bardage aggro-rouge, store et métal déployé).

Nous commençons par la description des spécificités du programme de calcul développé qui intègre les modèles présentés au chapitre 3.

Nous comparons ensuite les prédictions des trois différentes approches de modélisation de l'écoulement pour les cas des bardages en pin brut et en pin aggloméré pour une épaisseur de lame d'air de 33 mm. Nous nous intéressons en particulier à la prédiction de la vitesse d'écoulement, à l'augmentation de la température d'air dans la lame d'air entre l'entrée et la sortie (gradient thermique vertical), et au gradient thermique horizontal dans la 2^{ème} couche de plâtre dont les mesures ont été présentées au chapitre 2.

Nous retenons une de ces trois approches que nous appliquons au cas du bardage aggro-rouge pour une épaisseur de 66 mm, et aux cas du store et du métal déployé pour une lame d'air de 100 mm. Nous concluons alors sur la qualité de la prédiction du modèle EPLM ici présenté.

Ensuite, nous évaluons la pertinence de la modélisation proposée par la réglementation thermique française. Pour cela, il s'agirait de comparer le flux de chaleur prédit dans le mur avec cette méthode

aux mesures réalisées. Ne disposant pas de mesures directes du flux de chaleur, c'est le gradient thermique horizontal dans le mur qui est utilisé.

Enfin nous appliquons la méthode proposée au paragraphe 3.3.2 pour le calcul du facteur solaire des protections solaires étudiées. Nous proposons ensuite une compilation formalisée des résultats obtenus qui permet d'envisager une prise en compte simple et approchée des protections solaires dans une plateforme de simulation thermique dynamique de bâtiment.

4.2 Description factuelle du code de calcul mis en place

Nous présentons ici brièvement le programme de calcul développé qui permet l'application des approches de modélisation présentées au chapitre 3.

4.2.1 Programmation

Le programme de calcul a été réalisé sous MATLAB, langage de programmation particulièrement performant pour les calculs numériques sous forme matricielle. Les bases de données externes sont stockées dans des fichiers d'extension *xlsx*.

Le temps de calcul pour une simulation des transferts sur une durée de 48 heures réalisée avec un pas de temps de 1 minute sur un ordinateur classique – 1 cœur à 2 Ghz utilisé – est de l'ordre de 3 à 5 secondes.

4.2.2 Constitution du fichier météorologique

Le choix de la séquence (cf tableau 2.2) fixe la constitution du fichier météorologique. Nous utilisons les données caractérisant les sollicitations extérieures issues de la mesure pour constituer le fichier météorologique. Les données sont ainsi :

- la densité de rayonnement incident total CLO (en appliquant le coefficient multiplicateur à la mesure comme présenté au paragraphe 3.1.2.3.2.1)
- la vitesse de vent extérieure (la direction de celui-ci n'étant pas mesurée)
- la température de l'air extérieur
- la température de brillance de ciel, calculée à partir de la température de l'air extérieur (cf équation 3.3, paragraphe 3.1.2.3.3.2)

4.2.3 Propriétés des matériaux et géométries

La géométrie de l'EPLM a été présentée au chapitre 2 ; elle est visible sur la figure 2.1. Ainsi l'EPLM se compose de 4 couches pour le Mur, de la lame d'air et une couche supplémentaire pour la Protection solaire. La modélisation par analogie rhéoélectrique est représentée sur la figure de l'annexe 1.

Cette composition de couches est fixée, mais l'épaisseur de chacune et le matériau associé sont des entrées modifiables permettant ainsi l'analyse d'un panel de composition plus large. Il est ainsi possible, à l'aide du code mis en place, de considérer un « Mur » partiellement transparent et donc

d'étudier une façade double peau (la protection solaire pouvant elle aussi être considérée comme partiellement transparente).

Les propriétés des matériaux sont lues dans une base de données externe.

4.2.4 Choix des caractéristiques de la modélisation

Le programme de simulation permet de prendre en compte un certain nombre de choix de modélisation. Nous les listons ici.

- Choix du schéma de résolution

Les choix possibles du schéma de résolution ont été présentés au chapitre 3.1.4.1. Par défaut, c'est le schéma de Crank-Nicolson qui est retenu.

- Choix du nombre de nœuds par couche

Il s'agit du nombre de nœuds placés dans chacune des couches du système (cf schéma de l'annexe 1 et paragraphe 3.1.1.2). Dans les calculs ici présentés, il est de 5.

- Prise en compte de la densité de flux radiatif CLO incidente

Au paragraphe 3.3.2, la méthode de calcul du facteur solaire est présentée. Celle-ci nécessite notamment de réaliser une simulation en considérant une densité de flux radiatif CLO incidente nulle. C'est une possibilité de notre code en sus de la prise en compte du fichier météorologique.

- Ouverture de la lame d'air

La lame d'air délimitée entre la protection solaire et le mur peut être considérée comme fermée ou ouverte. Si elle est considérée fermée, des corrélations correspondant à la convection libre dans une cavité fermée sont alors utilisées. Celles-ci correspondent à la méthode de calcul proposée par la norme NF EN 673 « Verre dans la construction – Détermination du coefficient de transmission thermique, U – Méthode de calcul ».

- Mode de renouvellement d'air

Dans le cas d'une lame d'air ouverte, les 4 configurations géométriques (*In-In*, *Out-In*, *In-Out*, et *Out-Out*) présentées au chapitre 1.1 et représentées sur la figure 1.1 sont possibles. Elles définissent notamment le terme convectif dans la lame d'air. Dans les calculs présentés dans ce chapitre, la configuration est toujours celle correspondant à notre configuration expérimentale, soit *Out-Out*.

- Le choix de modélisation de l'écoulement de l'air dans la lame

Dans le chapitre 3, les trois approches différentes ont été présentées avec précision. Ces méthodes ont été implémentées pour le calcul de la vitesse d'écoulement et du coefficient de convection associé dans la lame d'air. Il est aussi possible d'appliquer la méthode correspondante à la norme NF EN 13363. Ainsi les méthodes possibles sont :

- Méthode CFD de Gan (2011),
- Méthode d'Ong (2003)
- Méthode PdC
- Méthode normée NF EN 13363

- Choix des critères de convergence

Des critères de convergence sont utilisés pour les approximations par itérations : pour le calcul de la vitesse d'air selon la modélisation par pertes de charge comme expliqué au paragraphe 3.2.2.1.2.4 et

pour le calcul des températures à chaque pas de temps (voir algorithme de calcul 3.1.4.2). Ces petits paramètres intervenant dans ces critères sont modifiables.

- Calcul des charges de chauffage et rafraîchissement avec choix des thermostats

Il est possible en fixant des thermostats de températures haut et bas de calculer les charges de rafraîchissement et chauffage pour maintenir la température d'air de la zone intérieure entre le thermostat bas et le thermostat haut. Cette fonctionnalité est notamment utilisée pour calculer les facteurs solaires.

- Choix du pas de temps

Le pas de temps est constant et modifiable. Par défaut, il est de 60 s.

4.3 Comparaison entre simulations et résultats expérimentaux

4.3.1 Choix des grandeurs physiques représentées

Afin de comparer les résultats de simulation avec la mesure, nous faisons le choix de présenter la vitesse de l'écoulement dans la lame d'air, le gradient thermique horizontal dans le Mur, plus précisément dans la 2^{ème} couche de plâtre (cf schémas 2.1 et 2.2), et la différence entre la température de l'air à la sortie de la lame d'air et la température de l'air à l'entrée de celle-ci.

Nous ne comparons pas directement la température de l'air au milieu de la lame d'air car le calcul de la température de lame d'air dépend fortement de la température d'air extérieur donnée par le fichier météorologique. Ainsi la précision du calcul sur la température de lame d'air repose fortement sur la précision de la mesure de la température d'air extérieur. Or, comme nous l'avons fait remarquer au chapitre 2, la température d'air extérieur est prise à une certaine distance de l'installation expérimentale (à 100 m environ, sur une station météo située sur le toit d'un bâtiment). Il peut donc y avoir une différence entre la température d'air extérieur mesurée et la température de l'air extérieur situé à proximité de l'entrée d'air de l'EPLM (cette dernière étant elle-même influencée par l'environnement de l'EPLM). C'est pourquoi nous choisissons d'évaluer l'évolution verticale de la température dans la lame d'air qui, utilisée conjointement avec la vitesse d'air, est un bon indicateur de l'échange convectif de cette lame avec les parois la délimitant et ainsi de l'évacuation de chaleur par la lame d'air.

De la même façon que nous désignons le gradient thermique horizontal, la différence de températures de part et d'autre de la 2^{ème} couche de plâtre par abus de langage, nous appellerons le gradient vertical de température d'air, la différence entre la température de l'air à la sortie de la lame d'air et la température de l'air à l'entrée de celle-ci.

Dans la suite, nous comparons ainsi les mesures réalisées avec les résultats des simulations pour les différentes approches de modélisation de l'écoulement dans la lame d'air.

4.3.2 Cas d'une lame d'air de 33 mm pour les deux bardages bois

Nous avons présenté au paragraphe 2.5 du chapitre 2, les mesures réalisées pour les cas des deux bardages bois avec une lame d'air de 33 mm ; nous avons comparé les comportements de l'EPLM

pour ces deux compositions. Nous choisissons ici cette épaisseur de lame d'air, car elle correspond aux règles de mise en œuvre du DTU 41.2 « revêtements extérieurs en bois ». Nous considérons donc ici la séquence n°2 (cf tableau 2.2) pour les cas des bardages en pin brut et en pin aggloméré. Les données mesurées ont été présentées au chapitre 2, au paragraphe 2.5.3. Le graphe de la densité de flux solaire incident est la figure 2.29, et la vitesse extérieure apparaît sur la figure 2.30.

Dans un premier temps nous comparons les résultats obtenus pour les 3 approches de modélisations « Gan », « Ong » et « PdC ». Puis, nous étudions les améliorations apportées par la prise en compte du vent dans le modèle de type pertes de charge (« PdC ») ; nous dénommons ci-après « PdC+ » ce modèle « PdC » amélioré.

Nous présentons d'abord le cas du bardage aggro-rouge.

4.3.2.1 Cas du bardage aggro-rouge

4.3.2.1.1 Vitesse d'écoulement vertical de l'air dans la lame d'air

Les vitesses d'écoulement vertical de l'air dans la lame d'air obtenues par simulation selon les trois approches sont tracées sur la figure 4.1, la vitesse mesurée apparaît aussi comme référence.

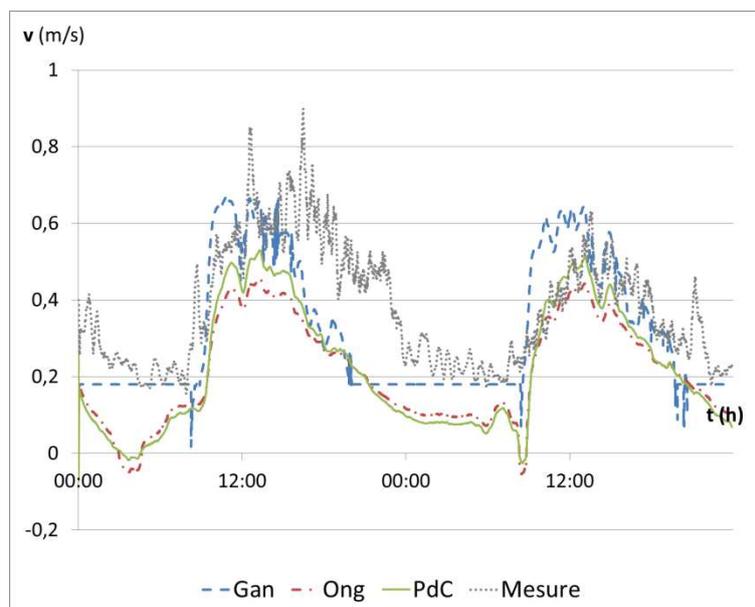


Figure 4.1 : Vitesse d'écoulement vertical de l'air calculée par les trois approches et vitesse mesurée, cas bardage aggro-rouge, séquence n°2. En tirets bleus « Gan », en tirets-points rouges, « Ong », en ligne continue verte, « PdC », et en pointillé gris, la mesure

La figure 4.1 montre que de manière générale pour les trois modélisations de l'écoulement de l'air dans la lame d'air, la vitesse d'écoulement est sous-estimée. De plus, les variations rapides de la vitesse d'air mesurée ne sont pas retrouvées dans les vitesses d'écoulement simulées.

On distingue assez nettement les résultats selon l'approche de Gan d'une part et de Ong et PdC d'autre part. En effet, pour Gan, quand les flux de chaleur vers la lame d'air sont nuls, nous considérons la vitesse fixe égale à 0,38 fois la vitesse d'air diurne maximale (cf paragraphe 2.8.4). Cette approximation entraîne des discontinuités dans les valeurs simulées et donc des sauts sur la figure 41.

La nuit, la vitesse calculée par les deux corrélations « Ong » et « PdC » est nettement plus faible que la vitesse mesurée.

Le modèle par cheminée thermique « Ong », et le modèle par calcul des pertes de charges « PdC » donnent des vitesses calculées très semblables. En effet, ces deux modèles calculent la vitesse d'écoulement en fonction de la différence de pression entre la lame d'air et l'extérieur, voir équations (E 3.24) pour Ong et (E 3.28) pour PdC, au paragraphe 3.2.2.1. La différence entre ces deux modèles repose essentiellement dans le calcul des pertes de charge de l'écoulement, simplifié pour le premier et détaillé pour le deuxième, mais qui impacte peu le calcul de la vitesse d'écoulement comme le montre la proximité des vitesses calculées par ces deux approches.

4.3.2.1.2 Gradient vertical de température d'air dans la lame d'air

Ici nous analysons la différence entre la température d'air en sortie de lame T_{L_s} et la température d'air en entrée de lame ($T_{L_e} = T_{ext}$), ce qui traduit la quantité de chaleur donnée à la lame d'air par l'EPLM et ainsi évacuée par convection naturelle. Cette différence correspond à la hauteur de la lame d'air près, au gradient vertical de la température d'air dans la lame d'air, c'est pourquoi nous nous permettons de parler de gradient de température vertical dans ce qui suit.

Les gradients verticaux de température d'air dans la lame d'air simulés pour les trois approches sont tracés sur la figure 4.2.

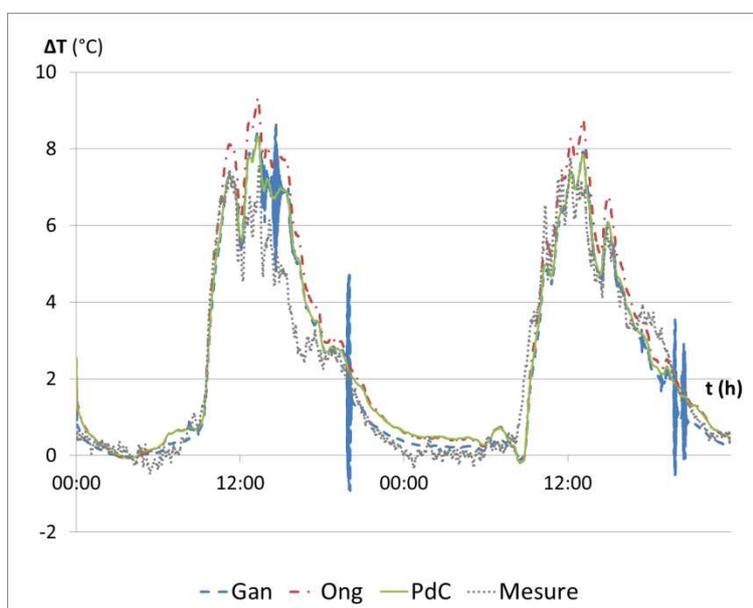


Figure 4.2 : Gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé par les trois approches et mesurée, cas bardage agglo-rouge, séquence n°2. En tirets bleus « Gan », en tirets-points rouges, « Ong », en ligne continue verte, « PdC », et en pointillé gris, la mesure

Nous notons une correspondance forte entre le gradient de température d'air dans la lame d'air calculé et le gradient mesuré, en particulier pour les modélisations de l'écoulement de l'air dans la lame d'air de « Gan » et de « PdC ».

Les discontinuités de la vitesse calculée selon la modélisation de « Gan » constatées sur la figure 4.1 entraînent des sauts dans les résultats de simulation, qui se notent aussi sur la figure 4.2. Ce sont donc des variations évidemment aberrantes, mais qui traduisent l'une des limites de cette modélisation.

Nous remarquons que malgré une sous-estimation par le calcul, quel que le soit le modèle retenu, de la vitesse d'écoulement de l'air dans la lame d'air, le gradient vertical de température d'air dans la lame d'air est lui bien approximé.

4.3.2.1.3 Gradient thermique horizontal dans le Mur

Le flux de chaleur par conduction au niveau des plaques de plâtre situées sur la partie extérieure du Mur traduit la quantité de chaleur qui transite dans ce Mur. Elle est la résultante, en termes de flux de chaleur traversant le Mur, des sollicitations radiative et convective provenant de l'environnement (ENV). Le gradient thermique horizontal dans le mur en est un marqueur.

Les gradients thermiques horizontaux dans la 2^{ème} couche de plâtre calculés par les trois approches sont tracés sur la figure 4.3 pour le cas du bardage aggro-rouge, pour la séquence n°2.

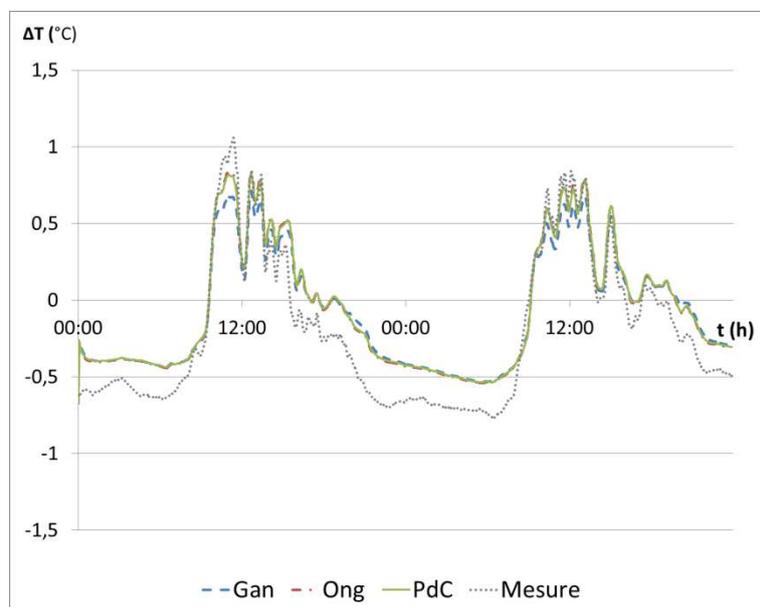


Figure 4.3 : Gradient thermique horizontal dans la 2^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, simulé selon les trois modélisations, et mesuré, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2. En tirets bleus « Gan », en tirets-points rouges, « Ong », en ligne continue verte, « PdC », et en pointillé gris, la mesure

Sur la figure 4.3, nous pouvons voir que les gradients thermiques horizontaux dans la 2^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, calculés en appliquant les trois modélisations, s'approchent en période diurne du gradient thermique horizontal mesuré. Les différences entre les trois approches de modélisation de l'écoulement de l'air dans la lame d'air sont très faibles.

Enfin, on remarque que pendant la nuit le gradient thermique horizontal est bien négatif mais est sous-estimé par les trois modèles. Ainsi la décharge nocturne du mur est sous-estimée. Cette sous-estimation peut être attribuée à notre avis, essentiellement à une sous-estimation de l'échange convectif nocturne simulé entre le Mur et la lame d'air.

Les résultats simulés, en termes de gradients thermiques horizontaux dans le Mur, ne se distinguent pas, en nocturne en particulier, selon les modèles utilisés (cf figure 4.3). Or les vitesses d'air dans la lame d'air simulées en utilisant le modèle de Gan se distinguent de celles simulées en utilisant les modèles de Ong et PdC, du fait d'une vitesse imposée en nocturne pour le modèle de Gan, selon l'approximation empirique proposée au chapitre 2 (cf paragraphe 2.8.4). Ceci suggère que la sous-estimation par le calcul de l'échange convectif entre l'air de la lame d'air et le Mur n'est a priori pas due à une sous-estimation des vitesses mais serait due à une sous-évaluation du coefficient d'échange nocturne par convection par les corrélations suggérées par Gan – Ong – PdC, c'est-à-dire une sous-estimation à faibles vitesses d'écoulement d'air. Cette suggestion sera confortée par l'analyse des figures 4.5 et 4.6 plus loin dans ce chapitre. Une analyse plus détaillée en est faite au paragraphe 4.3.2.1.5.

4.3.2.1.4 Prise en compte de la vitesse d'air extérieur avec le modèle PdC : approche PdC+

Nous avons bien mis en évidence l'influence du vent extérieur sur l'écoulement dans la lame d'air à partir des mesures expérimentales au paragraphe 2.7.2. Puis dans le chapitre 3 (modélisation), nous avons présenté des travaux suggérant que l'effet du vent sur la convection naturelle qui prend place dans la cavité ouverte peut-être modélisé par une pression motrice qui fait intervenir des coefficients de pression (cf paragraphe 3.2.2.1.2.3). L'utilisation de ces travaux permet d'introduire l'effet du vent dans le calcul de la vitesse d'écoulement dans la lame d'air suivant la modélisation de type « PdC » (équation 3.28) ; nous notons « PdC+ » cette approche « PdC » modifiée.

Nous comparons ici la vitesse d'écoulement prédite par le modèle EPLM avec et sans prise en compte du vent extérieure et en évaluons l'impact sur le calcul du gradient vertical de température d'air dans la lame et sur gradient thermique horizontal dans le Mur.

Les vitesses d'écoulement dans la lame d'air calculées avec et sans prise en compte de la vitesse de vent extérieur par l'approche par pertes de charge, sont tracées sur la figure 4.4 pour le bardage aggro-rouge, séquence n°2.

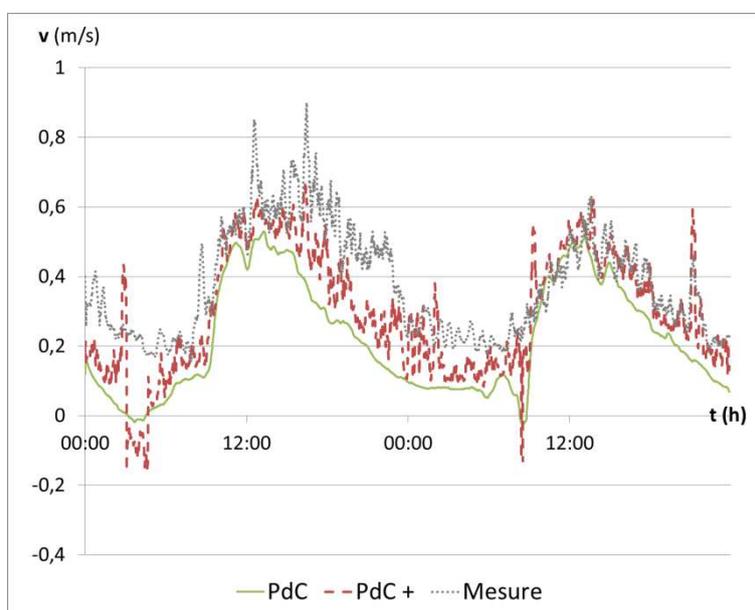


Figure 4.4 : Vitesse de l'écoulement de l'air dans la lame d'air calculée avec ou sans prise en compte du vent extérieur et vitesse mesurée, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2. En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure

Sur la figure 4.4, nous pouvons voir que la prise en compte du vent extérieur améliore la prédiction de la vitesse d'écoulement de l'air dans la lame d'air. Ainsi celle-ci est plus élevée de par l'effet de la pression motrice liée au vent ; on retrouve aussi les variations rapides de cette vitesse d'air ce qui confirme qu'elles sont bien liées à la vitesse de vent extérieur.

Il faut cependant noter que toutes les variations rapides ne coïncident pas. Ceci suggère que la vitesse de vent extérieur n'est pas suffisante pour expliquer les fluctuations et que l'orientation du vent mérite a priori d'être prise en compte.

Les gradients verticaux de température d'air dans la lame d'air sont calculés avec et sans prise en compte de la vitesse de vent extérieur par la modélisation par pertes de charge (modélisations « PdC » et « PdC+ ») sont tracés sur la figure 4.5. Les gradients thermiques horizontaux calculés de la même façon sont tracés sur la figure 4.6.

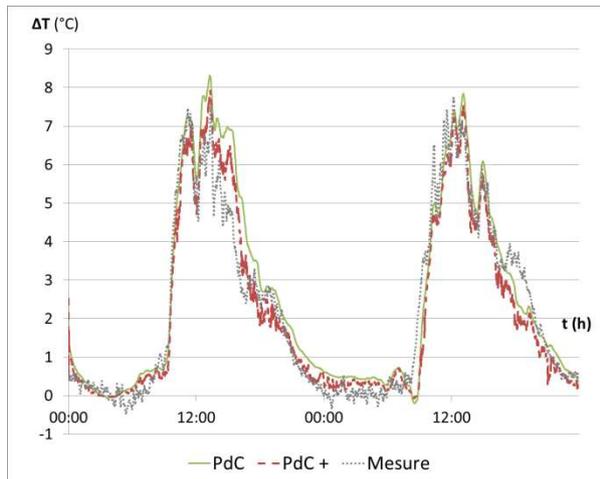


Figure 4.5 Gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur, et différence mesurée, cas bardage aggro-rouge, séquence n°2.

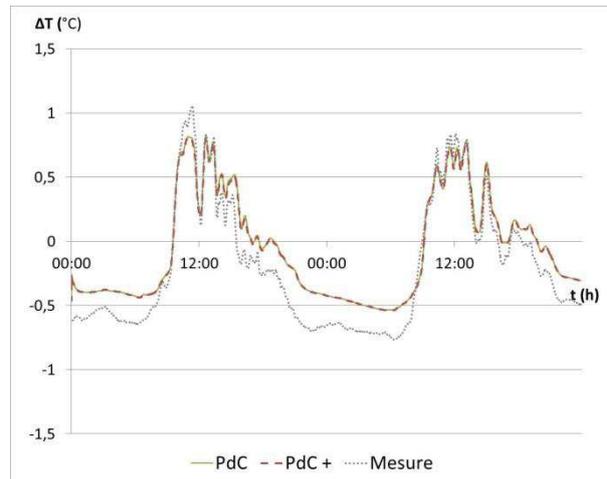


Figure 4.6 : Gradient thermique horizontal dans la 2^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur et gradient mesuré, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2.

En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure

Sur la figure 4.5, nous pouvons voir que l'approche « PdC+ » permet de retrouver les variations rapides de température dans la lame d'air, qui sont liées aux variations rapides de vent.

Mais la lecture de la figure 4.6 nous permet de constater que la prise en compte du vent extérieur bien qu'améliorant la prédiction de la vitesse d'écoulement dans la lame d'air, n'améliore pas la prédiction du gradient thermique horizontal dans la 2^{ème} couche de plâtre.

L'analyse de ces deux figures confirme a priori que l'explication de la sous-estimation nocturne du flux à travers le mur s'explique par la sous-estimation du coefficient de convection entre l'air de la lame d'air et le Mur. Ce point est analysé plus en avant au paragraphe ci-dessous.

4.3.2.1.5 Analyse de la sous-estimation du flux de chaleur dans le Mur la nuit

Dans le modèle de Gan (2011) le coefficient de convection entre l'air de la lame d'air et le Mur est issu du calcul par CFD, et est calculé conjointement à la vitesse d'écoulement de l'air comme présenté au chapitre 3, au paragraphe 3.2.1.2. Les corrélations établies par Gan sont valides seulement lorsque le flux de chaleur vers la lame d'air est positif. Ainsi, quand celui-ci est négatif, nous fixons la vitesse de la lame d'air à partir de la vitesse maximale diurne, et le coefficient de convection est calculé à partir de la norme EN 673 pour le calcul de convection dans une cavité fermée.

Pendant la journée, quand l'apport de chaleur vers la lame d'air induit un tirage thermique, les corrélations établies par Gan s'appliquent, le coefficient de convection est élevé et l'influence du vent sur les échanges convectifs alors faible. Le flux de chaleur convectif entre la lame d'air et le Mur est alors correctement estimé. Au contraire, la nuit, le coefficient de convection calculé est faible et il ne prend pas en compte les échanges convectifs associés au vent extérieur. Bien que les températures d'air soient relativement bien estimées, cette sous-estimation du coefficient de convection entre l'air de la lame d'air et le Mur implique une sous-estimation de la densité de flux de chaleur dans le Mur la nuit, qui est caractérisée notamment par un gradient thermique horizontal dans le Mur lui aussi sous-estimé.

Les modèles de Ong et PdC présentés au paragraphe 3.2.2 du chapitre 3, différencient les calculs de la vitesse d'écoulement de l'air et le calcul du coefficient de convection entre l'air de la lame d'air et le Mur. La vitesse d'air est calculée à partir de la différence de pression entre l'air dans la lame d'air et l'air extérieur. Pour le calcul du coefficient de convection, une corrélation qui lie le coefficient de convection au nombre de Rayleigh valable pour des mouvements de convection naturelle dans une cavité ouverte est utilisée. Nous avons vu au paragraphe 4.3.2.1.1, (figure 4.1) que la vitesse d'écoulement de l'air est sous-estimée par les modèles de « Ong » et « PdC », mais que le fait de prendre en compte l'influence de la vitesse de vent extérieure avec le modèle « PdC+ » améliore nettement la prédiction de la vitesse d'écoulement de l'air dans la lame d'air (figure 4.4). Cependant le modèle de prise en compte du vent extérieur ne modifie pas le calcul du coefficient de convection entre l'air de lame d'air et le Mur. Ainsi le vent induit un mouvement de convection forcé dans la lame d'air dont on prend en compte l'impact sur la vitesse d'écoulement mais pas sur le coefficient de convection associé.

Le jour, quand l'apport radiatif sur la protection solaire est élevé, la protection solaire s'échauffe et la température de surface interne de la protection solaire est très supérieure à la température d'air extérieur, ainsi le nombre de Rayleigh est élevé. A l'opposé la nuit, les transferts de chaleur sont plus faibles et les températures de la surface interne de la protection solaire, de l'air extérieur et de la lame d'air sont très proches. Le nombre de Rayleigh calculé est alors faible. Ces évolutions des températures sont confirmées par les mesures des températures d'air et de surface présentées au paragraphe 2.5.2.1 sur les figures 2.23, 2.24 et 2.25 pour le cas étudié dans ce paragraphe (bardage aggro-rouge, pour une lame d'air de 33 mm, séquence n°2). On retrouve aussi ces variations journalières pour le nombre de Rayleigh calculé à partir des mesures sur la figure 2.54 au paragraphe 2.8.3.

Le fait que le nombre de Rayleigh soit élevé le jour et très faible la nuit implique que le coefficient de convection entre l'air de la lame d'air et le Mur, calculé par les modèles « Ong », « PdC » et « PdC+ », est élevé le jour et faible la nuit. Le jour, quand l'écoulement est essentiellement dû au phénomène de tirage thermique, l'échange de chaleur par convection entre la lame d'air et le mur est bien estimé. La nuit, quand l'écoulement résulte surtout de l'influence du vent extérieur et que le coefficient de convection entre la lame d'air et le Mur est alors sous-estimé, l'échange de chaleur par convection entre la lame d'air et le Mur est sous-estimé.

Les échanges convectifs dus au vent sur une surface en contact avec l'air extérieur sont associés à de la convection forcée. Nous considérons ainsi l'écoulement lié au vent comme de la convection forcée, alors que l'écoulement correspondant au tirage thermique est lui associé à de la convection naturelle. Ainsi, l'écoulement résultant de ces deux phénomènes correspondrait lui à de la convection mixte. Une étude de cet écoulement et de ses caractéristiques permettrait de déterminer les coefficients de convection associés et permettrait alors une amélioration de notre modèle PdC+.

Finalement, il faut remarquer que cet écart entre résultats de simulation et mesures pour la densité de flux de chaleur dans le Mur la nuit implique que la simulation surestime l'apport de chaleur total vers la zone intérieure.

Ceci est confirmé par l'évolution de la température mesurée derrière l'isolant (cf figure 2.1 et 2.2). En effet, celle-ci décroît sur la période de mesure ce qui traduit une décharge en chaleur du mur. A l'opposé, la température simulée au même point croît, même si très légèrement, sur la même période. Ceci correspond bien au fait que la densité de flux mesurée est en moyenne négative sur la séquence alors que la densité de flux simulé est très légèrement positive (cf figure 4.6). Cependant, en comparant la méthode « PdC+ » à la méthode de simulation issue de la réglementation thermique

française comme on le fera plus loin au paragraphe 4.4, nous noterons que les prédictions du modèle « PdC+ » sont bien meilleures que celles correspondant à la réglementation.

4.3.2.2 Cas du bardage brut-clair

Nous avons vu dans le chapitre 2, et en particulier au paragraphe 2.5.2.3 que le comportement de l'EPLM avec le bardage brut-clair est nettement différent du cas avec le pin aggloméré. Ainsi, les vitesses d'écoulement d'air dans la lame d'air relevées étaient beaucoup plus faibles pour le cas du bardage brut-clair que pour le cas du bardage aggro-rouge et le gradient vertical de température d'air dans la lame d'air était lui aussi beaucoup plus faible. Ces différences traduisent le fait que dans le cas du bardage brut-clair, la chaleur fournie à la lame d'air puis évacuée par transport convectif est beaucoup plus faible. Nous voulons ici voir si les trois modélisations que nous utilisons traduisent bien ce phénomène. Nous présentons les résultats des simulations des trois types de modélisation (Gan, Ong et PdC), dont nous analysons rapidement les différences puis nous présentons les résultats des simulations des modèles PdC et PdC+ et nous analysons plus finement le comportement de l'EPLM dans cette configuration et la qualité de la modélisation.

C'est toujours la séquence n°2 qui est considérée pour la suite.

4.3.2.2.1 Comparaison des trois modèles de simulation

Les vitesses d'écoulement de l'air dans la lame d'air calculées selon les 3 modélisations (Gan, Ong, PdC) sont tracées sur la figure 4.7.

Il faut préciser que pour les modèles de Ong et PdC, quand les termes moteurs pour le calcul de la vitesse sont négatifs, la vitesse est négative et donc considérée verticale descendante. Nous avons expliqué au paragraphe 2.8.1 dans quelles conditions cet écoulement vertical descendant peut prendre place. Rappelons ici que les vitesses mesurées sont toujours positives indépendamment du sens réel de l'écoulement, ce point est pris en compte dans ce qui suit, pour l'analyse comparative entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux.

Sur la figure 4.7, par comparaison avec le cas du bardage pin aggloméré (figure 4.1), nous pouvons remarquer que les vitesses simulées et mesurées sont relativement faibles, mais conservent leurs variations rapides.

La vitesse d'écoulement de l'air dans la lame d'air, calculée selon l'approche de Gan, donne des résultats très différents de celles obtenues avec les modèles de Ong et PdC. Nous notons aussi que les vitesses d'écoulement simulées par les modèles Ong et Pdc prennent des valeurs négatives, notamment le deuxième jour entre 08:00 et 10:00. Nous pouvons faire le lien entre cette vitesse négative et les températures d'air dans la lame et à l'extérieur, cette explication vient plus bas (paragraphe 4.3.2.2.4).

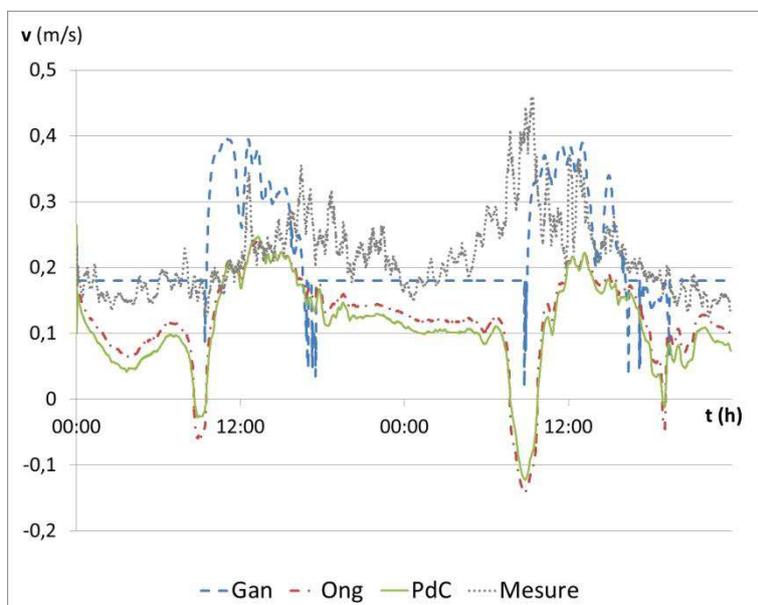


Figure 4.7 : Vitesse d'écoulement vertical de l'air calculée par les trois approches et vitesse mesurée, cas bardage brut-clair, séquence n°2. En tirets bleus « Gan », en tirets-points rouges, « Ong », en ligne continue verte, « PdC », et en pointillé gris, la mesure

Les gradients verticaux de température d'air dans la lame d'air simulés pour les trois approches sont tracés sur la figure 4.8 et les gradients thermiques horizontaux dans la 2^{ème} couche de plâtre sur la figure 4.9.

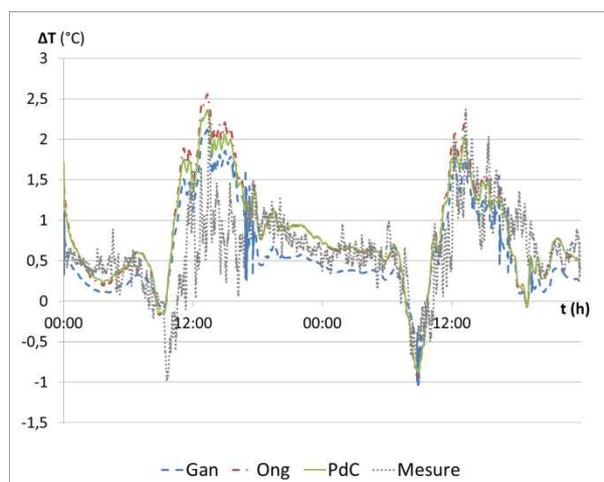


Figure 4.8 : Gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé pour les trois approches et mesuré, cas bardage brut-clair, séquence n°2.

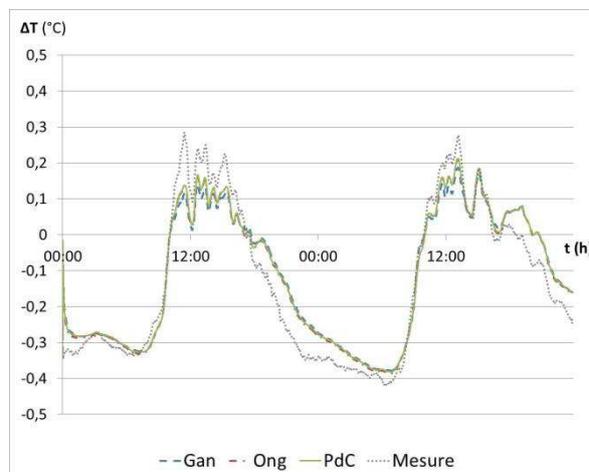


Figure 4.9 : Gradient thermique horizontal dans la 2^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, simulé selon les trois modélisations, et mesuré, cas du bardage brut-clair, séquence n°2.

En tirets bleus « Gan », en tirets-points rouges, « Ong », en ligne continue verte, « PdC », et en pointillé gris, la mesure

Sur la figure 4.8, nous notons que les gradients verticaux prédits par les trois modélisations sont proches de ceux mesurés dans la lame d'air. Le gradient vertical est 3 à 4 fois plus faible que celui du cas avec le bardage aggro-rouge visible sur la figure 4.2.

Les gradients thermiques horizontaux dans le plâtre calculés selon les trois modélisations (figure 4.9) sont très proches et prédisent assez bien le gradient thermique horizontal mesuré. Cependant, on note comme pour le cas du bardage aggro-rouge, que la décharge nocturne dans le Mur est

légèrement sous-estimée. Une analyse plus fine des gradients thermiques horizontaux est faite au paragraphe 4.3.2.2.3.

Il faut noter que le modèle de Gan se base sur des corrélations établies pour des configurations où la densité de flux de chaleur vers la lame d'air est toujours positive et supérieure à 100 W/m^2 (cf chapitre 3, paragraphe 3.2.1). Ici, les flux de chaleur vers la lame d'air sont plus faibles, et la situation où le flux de chaleur est négatif est fréquente (visible sur la figure 4.7 quand la vitesse est constante égale à $0,18 \text{ m/s}$). Comme déjà noté, la discontinuité de la méthode de modélisation (changement de signe du flux de chaleur la lame d'air) se traduit par des sauts dans les résultats de simulation. Le modèle de Gan semble donc moins adapté que les deux autres modèles.

4.3.2.2.2 Prise en compte du vent extérieur avec le modèle PdC : approche PdC+

Les vitesses d'écoulement dans la lame d'air calculées avec et sans prise en compte de la vitesse de vent extérieur par l'approche par pertes de charge, sont tracées sur la figure 4.10 pour le cas du bardage brut-clair, séquence n°2.

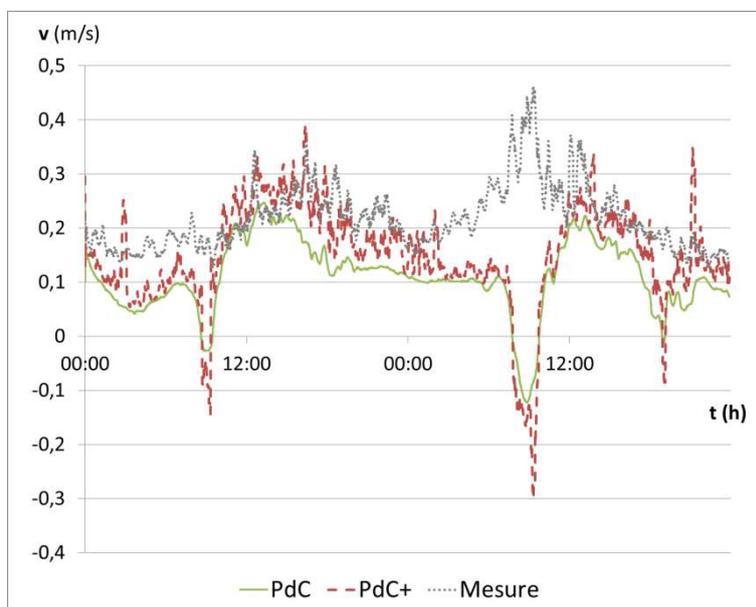


Figure 4.10 : Vitesse de l'écoulement de l'air dans la lame d'air calculée avec ou sans prise en compte du vent extérieur et comparée à la mesure, cas du bardage brut-clair, séquence n°2. En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure.

Sur la figure 4.10, il apparaît que la prise en compte du vent extérieur améliore la précision de la prédiction de la vitesse d'écoulement dans la lame d'air. Nous pouvons aussi voir que le rapport entre la vitesse d'écoulement associée au vent extérieur et celle associée au tirage thermique est ici plus grand que pour le cas du bardage aggro-rouge.

Les gradients verticaux de température d'air dans la lame d'air calculées avec et sans prise en compte de la vitesse de vent extérieur par la modélisation par pertes de charge (modélisations « PdC » et « PdC+ ») sont tracées sur la figure 4.11. Les gradients thermiques horizontaux sont tracés sur la figure 4.12.

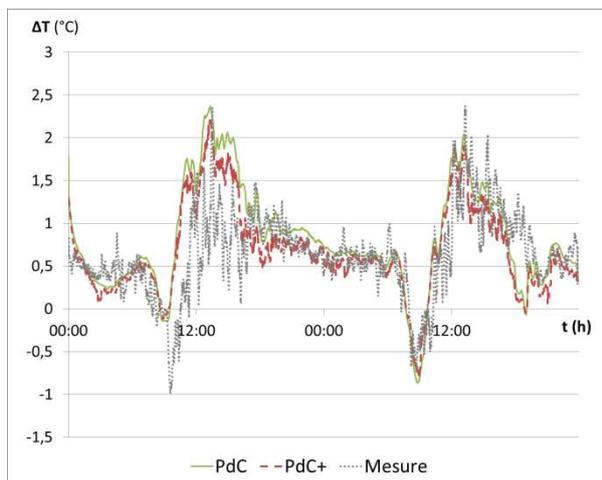


Figure 4.11 : Gradient vertical de température d'air de la lame d'air calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur, et gradient mesurée, cas bardage brut-clair, séquence n°2.

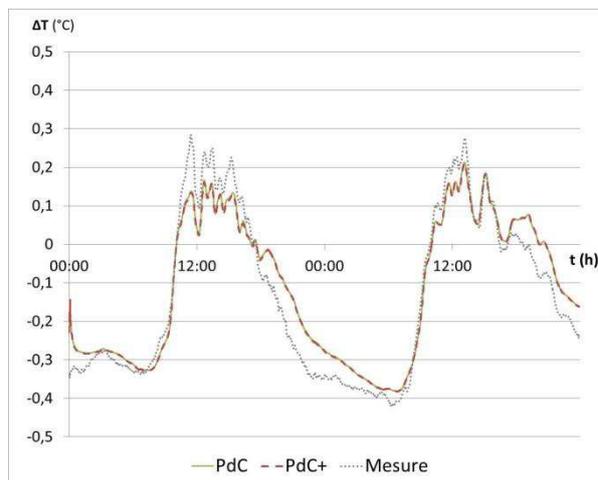


Figure 4.12 : Gradient thermique horizontal dans la 2^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur et gradient mesuré, cas du bardage brut-clair, séquence n°2.

En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure

Comme pour le bardage aggro-rouge, nous constatons que l'amélioration de la précision de la vitesse de l'écoulement n'induit pas une amélioration de la prédiction de du gradient thermique horizontal dans la 2^{ème} couche de plâtre.

4.3.2.2.3 Flux de chaleur et comportement du système

Comme pour le cas du bardage aggro-rouge, nous retrouvons le fait que pendant la nuit la densité de flux de chaleur est légèrement sous-estimée, c'est-à-dire que la décharge du mur est minorée. Dans les cas simulés comme pour la mesure, la moyenne négative du gradient thermique horizontal dans le Mur sur la séquence traduit une décharge générale du mur sur la séquence.

Les variations du gradient thermique horizontal sont ici de l'ordre de trois fois plus faibles que dans le cas du bardage aggro-rouge visibles sur la figure 4.6. Ceci s'explique par le fait que la chaleur absorbée par le bardage brut-clair est plus faible que celle absorbée par le bardage aggro-rouge, et la chaleur absorbée est aussi moins bien conduite vers la lame d'air ; ainsi la chaleur fournie à la lame d'air est plus faible que pour le cas du bardage aggro-rouge.

Le très faible gradient vertical mesuré (figure 4.11) montre que la température dans la lame d'air est proche de la température d'air extérieur. Le bardage brut-clair se comporte comme un écran qui bloque presque complètement les apports radiatifs et qui limite aussi les transferts convectifs en abaissant le coefficient de convection sur la surface extérieure du Mur, sans élever la température d'air au contact du Mur.

Le bardage aggro-rouge lui absorbe et conduit vers la lame d'air une part des apports radiatifs et c'est la lame d'air qui évacue ces apports par transport convectif. La lame d'air est alors chauffée et les mouvements convectifs plus conséquents que dans le cas du bardage brut-clair, le flux de chaleur vers le Mur, et donc le gradient thermique horizontal est donc plus élevé que dans le cas du bardage brut-clair.

4.3.2.2.4 Ecoulement vertical descendant

Pour les modèles de Ong et PdC, nous constatons une concordance entre les moments où le gradient vertical simulé prend des valeurs négatives et le moment où la vitesse simulée est elle aussi négative. Ainsi au matin de la deuxième journée, nous sommes dans la configuration décrite au paragraphe 2.8.1 d'écoulement vertical descendant. En effet, à ce moment-là, la température d'air dans la lame d'air simulée est inférieure à la température d'air extérieur, le terme moteur de l'écoulement est donc négatif. Peu après, l'apport radiatif chauffe la protection solaire qui conduit puis échange une partie de cette chaleur avec la lame d'air. Alors la température d'air de la lame d'air est plus élevée que la température d'air extérieur, et l'écoulement vertical ascendant prend place. Une mesure du sens de l'écoulement serait nécessaire pour confirmer ce point.

4.3.2.3 Conclusions

Nous avons vu que les trois approches de modélisation mettent bien en évidence la différence de comportement entre l'EPLM avec le bardage brut-clair, et l'EPLM avec le bardage aggro-rouge.

Nous avons noté certaines limites pour le modèle par calcul CFD basé sur les travaux de Gan (2011). Ce modèle a été établi pour des densités de flux de chaleur d'apport à la lame d'air toujours positives et supérieures à 100 W/m^2 . L'adaptation de ce modèle de telle manière à pouvoir aussi décrire le cas avec une densité de flux de chaleur négative vers la lame d'air donne des résultats relativement satisfaisants pour la prédiction du gradient thermique horizontal dans le Mur, malgré une vitesse d'écoulement dans la lame d'air plutôt éloignée de la vitesse mesurée. L'adaptation du modèle aux densités de flux vers la lame d'air négatives introduit une discontinuité dans la modélisation de l'écoulement dans la lame d'air et ainsi des sauts dans les résultats de simulation.

Les prédictions des modèles d'Ong et de PdC pour la vitesse d'écoulement de l'air, du gradient vertical de température d'air dans la lame d'air et du gradient thermique horizontal dans le Mur peuvent être qualifiées de bonnes. Les résultats issus des deux modèles sont relativement semblables. Ceci s'explique notamment par le caractère proche de leur méthode de modélisation. Ainsi les deux se basent sur des calculs de la vitesse d'air à partir de la différence de pression entre l'air de la lame d'air et l'air extérieur. Et c'est la même corrélation qui est utilisée pour déterminer le coefficient de convection dans la lame d'air. De plus, ces deux modèles permettent de décrire des vitesses d'écoulement verticales descendantes qui correspondent aux données mesurées. Cependant on note que la vitesse de l'écoulement de l'air est légèrement sous-estimée et que les variations rapides de vitesse d'air ne sont pas prédites. Enfin, une sous-estimation de la densité de flux de chaleur dans le Mur la nuit entraîne une surestimation de l'apport total de chaleur dans le Mur pour les séquences étudiées.

La prise en compte de la vitesse du vent extérieur dans le modèle PdC+ permet de mieux prédire la vitesse d'écoulement de l'air dans la lame d'air. Mais elle ne permet pas de mieux estimer la décharge de chaleur la nuit du Mur. Ceci s'explique par le fait que, si la prise en compte du vent extérieur impacte le calcul de la vitesse d'écoulement de l'air dans la lame d'air, elle ne change pas le calcul de coefficient de convection entre l'air de la lame d'air et le Mur. Ainsi la convection principalement naturelle la journée est bien estimée alors que la convection principalement forcée la nuit est sous-estimée.

Par la suite, nous retenons le modèle PdC+, car il permet de prendre en compte l'influence de la vitesse de vent extérieur sur la vitesse d'écoulement dans la lame d'air.

4.3.3 Autres cas : bardage, store et métal déployé

Dans la suite nous utilisons seulement les approches de modélisation de l'écoulement de l'air dans la lame d'air PdC et PdC+.

4.3.3.1 Cas du bardage aggro-rouge pour une épaisseur de lame d'air de 66 mm

Nous avons vu dans le paragraphe 4.2.1 que les prédictions des approches PdC et PdC+ dans le cas du bardage aggro-rouge pour une épaisseur de lame d'air de 33 mm pouvaient être qualifiées de satisfaisantes. Nous voulons ici évaluer si le modèle utilisé s'applique aussi bien au cas d'une épaisseur de lame d'air de 66 mm.

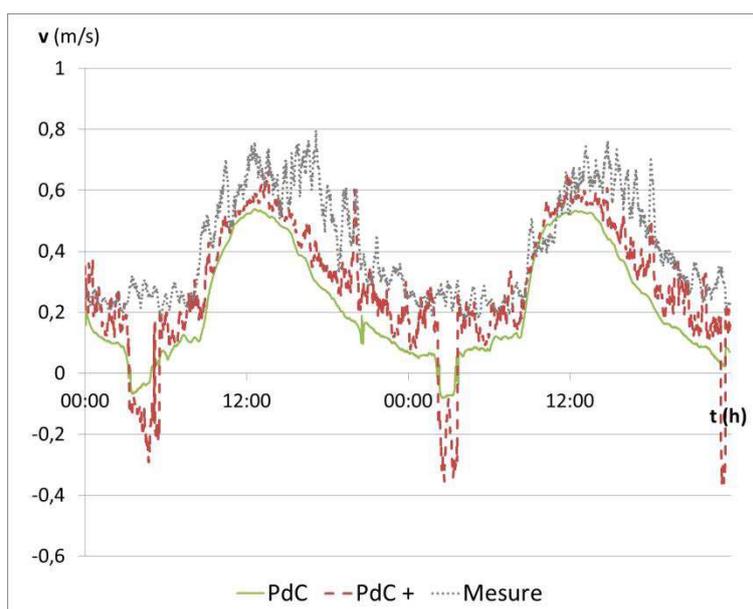


Figure 4.13 : Vitesse de l'écoulement de l'air dans la lame d'air calculé avec ou sans pris en compte du vent extérieur et comparé à la mesure, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°4. En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure

Les vitesses d'écoulement dans la lame d'air calculées avec et sans prise en compte de la vitesse de vent extérieur par l'approche par pertes de charge, sont tracées sur la figure 4.13 pour le cas du bardage aggro-rouge, séquence n°4.

Les gradients verticaux de température d'air dans la lame d'air calculés avec et sans prise en compte de la vitesse de vent extérieure par la modélisation par pertes de charge (modélisations PdC et PdC+) sont tracés sur la figure 4.14. Les gradients thermiques horizontaux calculés de la même façon sont tracés sur la figure 4.15.

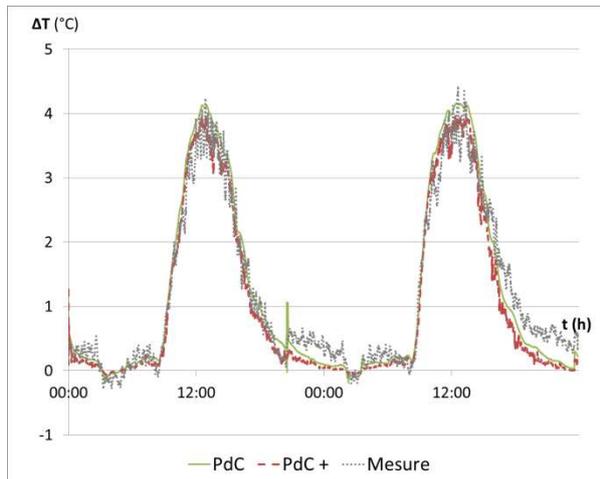


Figure 4.14 : Gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur, et gradient mesurée, cas bardage aggro-rouge, séquence n°4.

En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure.

La figure 4.13 montre que la prédiction de la vitesse d'écoulement dans la lame d'air est meilleure avec le modèle PdC+ qui prend en compte l'effet du vent extérieur. La vitesse d'écoulement simulée sous-estime légèrement la vitesse d'écoulement mesurée. On retrouve aussi, comme pour le cas du bardage brut-clair le fait que le matin l'écoulement est vertical descendant. Ce phénomène a été expliqué au paragraphe 4.3.2.1.

Nous constatons à partir de la figure 4.14 que le gradient vertical de température d'air dans la lame d'air simulé approche très bien celui mesuré. La prise en compte du vent extérieur induit une légère augmentation de celui-ci.

Enfin, nous retrouvons le même comportement le gradient thermique horizontal simulé que pour le cas de l'épaisseur de lame d'air de 33 mm. En effet, la journée, le gradient thermique horizontal dans la 2^{ème} couche de plâtre est très bien approché par les modèles PdC et PdC+. Mais la nuit, il est sous-estimé : le modèle traduit mal la décharge de chaleur nocturne du Mur. Une explication a été proposée au paragraphe 4.3.2.1.5.

Nous proposons ici de comparer les comportements de l'EPLM muni d'un bardage aggro-rouge selon que l'épaisseur de lame d'air est 33 mm ou 66 mm, notamment en analysant le flux d'évacuation de chaleur par la lame d'air. Le premier cas (épaisseur de lame d'air de 33 mm) a été présenté plus haut au paragraphe 4.3.2.1.

Nous pouvons constater en comparant les figures 4.13 et 4.4 que la vitesse d'écoulement a sensiblement le même profil, avec une vitesse maximale d'écoulement proche de 0,6 m/s. Le gradient vertical de température d'air dans lame d'air est lui plus faible sur la figure 4.14 c'est-à-dire pour le cas avec épaisseur de lame d'air de 66 mm que sur la figure 4.5 ; son maximum est de l'ordre de 4°C alors qu'il est de 6°C pour le cas avec lame d'air d'épaisseur 33 mm.

Le transport convectif est directement proportionnel au produit du débit (c'est à dire le produit de la vitesse d'écoulement de l'air par l'épaisseur de lame d'air) par le gradient vertical de température comme le montre les équations (E 3.5) et (E 3.6) au chapitre 3. En utilisant ici les valeurs approximativement relevées plus haut, on trouve un ordre de grandeur tel que le flux de chaleur

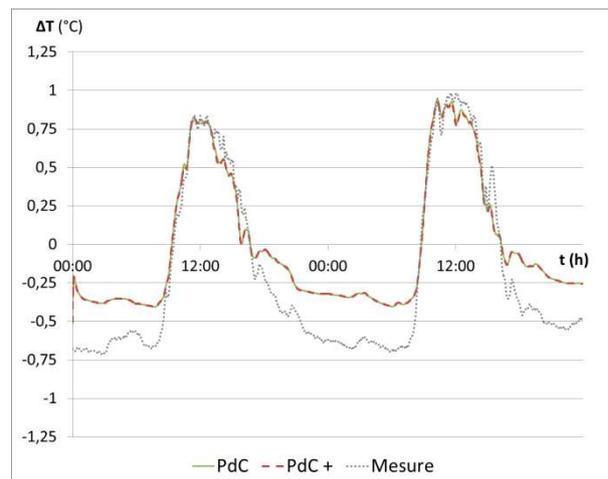


Figure 4.15 : Gradient thermique horizontal dans la 2ème couche de plâtre de l'EPLM, calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur et gradient mesuré, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°4.

évacué par la lame d'air du cas avec lame d'air de 66 mm, est 50% plus élevé que le cas avec lame d'air de 33 mm. Cependant le flux de chaleur radiatif incident sur les séquences considérées n'est pas le même comme on peut le voir en comparant les figures 2.21 et 2.32. L'énergie totale incidente sur les deux jours pour le cas avec lame d'air d'épaisseur 33 mm, est de 16,66 kWh et de 24,7 kWh pour l'autre, ce qui correspond là aussi à une différence de 50%. On vérifie donc que le comportement du système EPLM mesuré et simulé est donc semblable pour ces deux cas comparés.

4.3.3.2 Cas du store pour une épaisseur de lame d'air de 100 mm

Nous considérons maintenant le store comme protection solaire, l'épaisseur de la lame d'air est de 100 mm et la séquence utilisée est la n°7 (cf tableau 2.2).

Il faut préciser que le store est perforé le rendant partiellement transparent et perméable. Nous voulons donc voir si dans le cas d'une faible perméabilité la modélisation de l'écoulement dans la lame d'air sélectionnée, s'applique aussi.

Les vitesses d'écoulement dans la lame d'air calculées avec et sans prise en compte de la vitesse de vent extérieur par l'approche par pertes de charge, sont tracées sur la figure 4.16 pour le cas du store, séquence n°7.

Les gradients verticaux de température d'air dans la lame d'air calculés avec et sans prise en compte de la vitesse de vent extérieur par la modélisation par pertes de charge (modélisations PdC et PdC+) sont tracés sur la figure 4.17. Les gradients thermiques horizontaux calculés de la même façon sont tracés sur la figure 4.18.

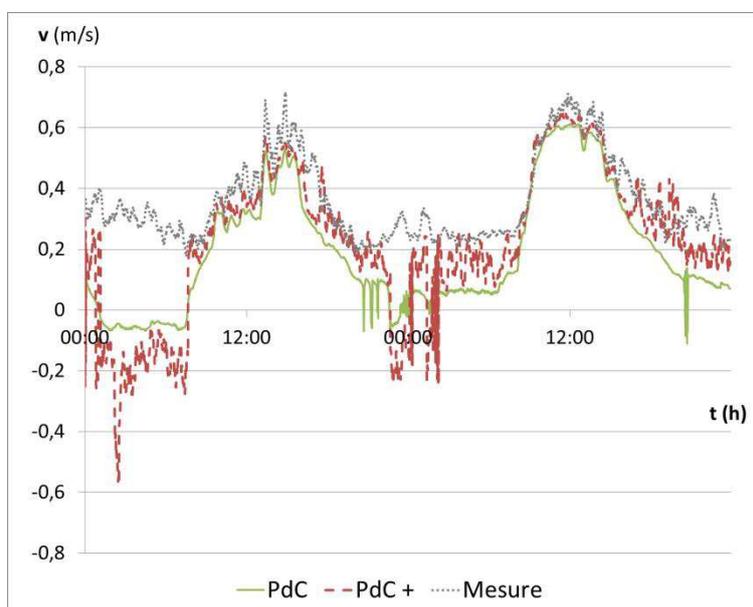


Figure 4.16 : Vitesse de l'écoulement de l'air dans la lame d'air calculé avec ou sans pris en compte du vent extérieur et comparé à la mesure, cas du store, séquence n°7. En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure

Nous constatons sur la figure 4.16, que pendant les périodes avec des apports solaires la vitesse de l'écoulement dans la lame d'air est très proche de celle mesurée. Cependant, la nuit la prédiction est moins bonne.

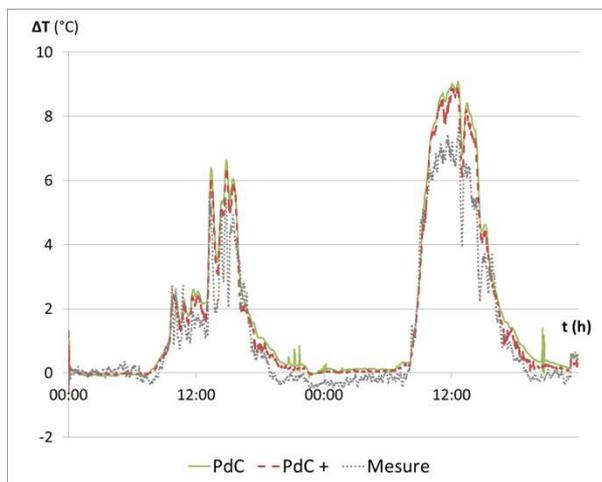


Figure 4.17 : Gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur, et gradient mesuré, cas du store, séquence n°7.

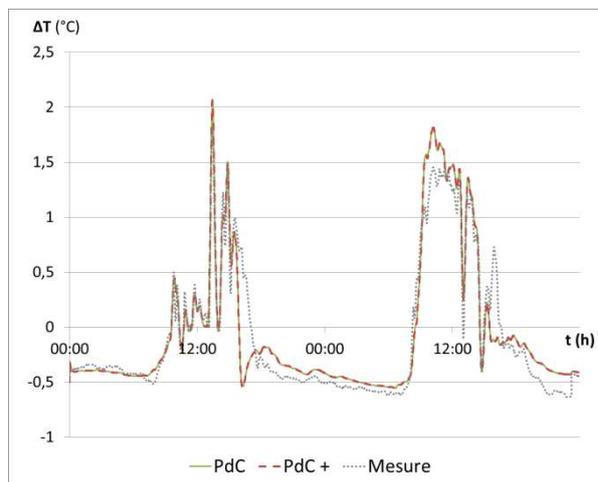


Figure 4.18 : Gradient thermique horizontal dans la 2^{ème} couche de plâtre de l'EPLM, calculé avec et sans prise en compte du vent extérieur et gradient mesuré, cas du store, séquence n°7.

En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure.

Le gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé avec l'approche PdC+ est très proche de celui mesuré (figure 4.17). On retrouve aussi le fait que la nuit, la température dans la lame d'air est égale à la température d'air extérieur.

La prédiction du gradient thermique horizontal est très bonne (figure 4.18). La transparence du store implique qu'une part du rayonnement incident est directement transmise vers la lame d'air. De plus, le store étant de faible épaisseur, conducteur et avec un coefficient d'absorption du rayonnement CLO élevé, une grande partie du rayonnement incident est transmis à la lame d'air. Les flux de chaleur vers la lame d'air sont donc plus élevés.

La journée un flux de chaleur élevé vers la lame d'air se traduit par une vitesse d'écoulement de l'air et un gradient vertical élevé (les deux sont plus élevés que pour le cas du bardage aggro-rouge pour une lame d'air plus fine). Le flux de chaleur évacué par transport convectif est donc nettement plus conséquent pour le cas du store que pour le cas du bardage aggro-rouge.

Enfin, il faut noter que cette protection solaire n'a pas d'inertie, c'est pourquoi on voit un lien direct entre apports solaires et mouvement de convection naturelle, ce qui était traduit par la très bonne concordance entre les évolutions du nombre de Rayleigh et de la vitesse d'écoulement (voir schéma sur figure 2.59).

Les variations des densités de flux de chaleur dans le mur sont élevées sur la figure 4.18, mais la sous-estimation de la décharge du Mur la nuit persiste comme pour le cas du bardage aggro-rouge.

4.3.3.3 Cas du métal déployé pour une lame d'air de 100 mm

Nous considérons maintenant le métal déployé avec une épaisseur de lame d'air de 100 mm et la séquence utilisée est la n°9 (cf tableau 2.2).

Le métal déployé est fortement perméable. Cette perméabilité peut limiter la mise en place d'un écoulement ascendant, notamment par un écoulement horizontal. Le métal déployé a une géométrie plus complexe, son coefficient de transmission en CLO a été considérée constant de par la hauteur du soleil, mais cela reste une approximation.

Les vitesses d'écoulement dans la lame d'air calculées avec et sans prise en compte de la vitesse de vent extérieur par l'approche par pertes de charge, sont tracées sur la figure 4.19 pour le cas du métal déployé, séquence n°9.

Les gradients verticaux de température d'air dans la lame d'air calculés avec et sans prise en compte de la vitesse de vent extérieure par la modélisation par pertes de charge (modélisations PdC et PdC+) sont tracés sur la figure 4.20. Les gradients thermiques horizontaux sont tracés sur la figure 4.21.

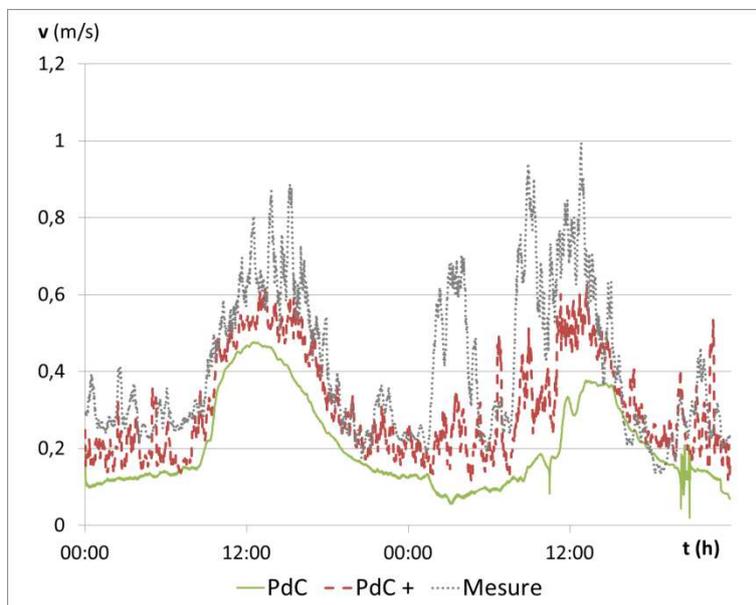


Figure 4.19 : Vitesse de l'écoulement de l'air dans la lame d'air calculé avec ou sans pris en compte du vent extérieur et comparé à la mesure, cas du métal déployé, séquence n°9. En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure.

Sur la figure 4.19, nous notons que la vitesse calculée par l'approche PdC+ est une assez bonne approximation de la vitesse mesurée. On note cependant que la vitesse mesurée subit des variations rapides de grandes amplitudes, que la prise en compte du vent extérieur telle qu'elle est faite, ne suffit pas à décrire. Ici, nous pouvons penser que la forme du métal déployé, et en particulier son caractère perméable font que les coefficients de pression pour la prise en compte du vent extérieur (voir paragraphe 3.2.2.1.2.3) devraient être augmentés pour prendre en compte les plus grandes surfaces de passage pour l'air.

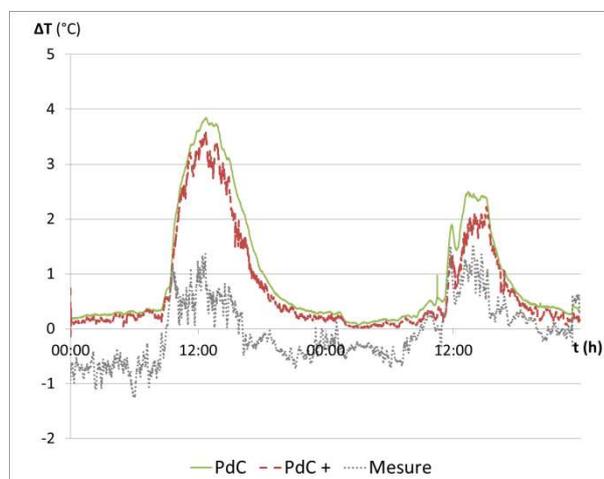


Figure 4.20 : Gradient vertical de température d'air dans la

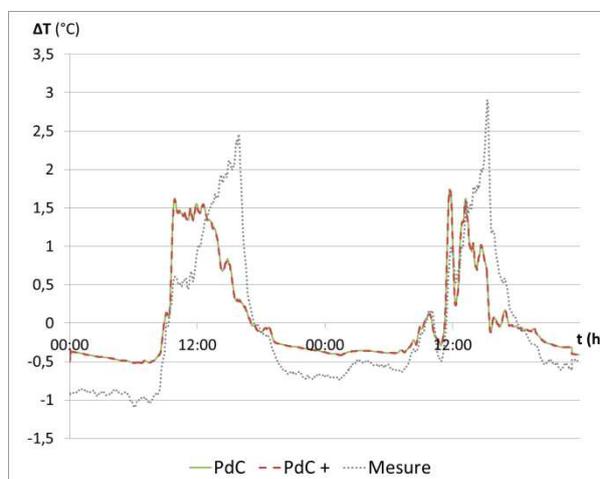


Figure 4.21 : Gradient thermique horizontal dans la 2^{ème}

En ligne continue verte, approche « PdC », en tirets rouges, « PdC+ » et en pointillés gris, la mesure.

Sur la figure 4.20, le gradient vertical de température d'air dans la lame d'air calculé apparaît trop élevé par rapport à la mesure. En effet, le gradient mesuré est très faible comparativement au cas du store montré dans le paragraphe précédent. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'écoulement n'est pas que vertical comme schématisé sur la figure 4.22 que nous présentons ici. La différence de température entre l'air de la lame d'air et l'air extérieur se traduit par une différence de pression de part et d'autre de la protection solaire. Celle-ci peut être considérée linéaire à l'extérieur de la lame d'air, et linéaire par partie à l'intérieur du fait des pertes de charge singulières à l'entrée et à la sortie (partie gauche de la figure 4.22). Quand la protection solaire est imperméable, la différence de pression entre l'air de la lame d'air et l'extérieur se traduit forcément par un écoulement vertical, mais quand la protection solaire est perméable, il peut y avoir un mouvement de convection horizontal à travers les « trous » de la protection solaire, ici le métal déployé (partie centrale de la figure 4.22). Ainsi, l'écoulement de l'air ne peut s'établir sur toute la hauteur de la lame d'air comme c'est le cas pour les autres protections solaires. Le schéma de la figure 4.22 montre que dans le cas d'un mouvement de convection naturelle ascendant la lame d'air, un mouvement de convection horizontal de l'extérieur vers la lame d'air prend place dans la partie basse de la lame d'air et à l'inverse, de la lame d'air vers l'extérieur dans la partie haute de celle-ci. Ainsi la vitesse au milieu de la lame d'air peut être élevée, mais l'échange convectif ne se fait pas sur toute la hauteur, et donc le gradient de température est moins élevé.

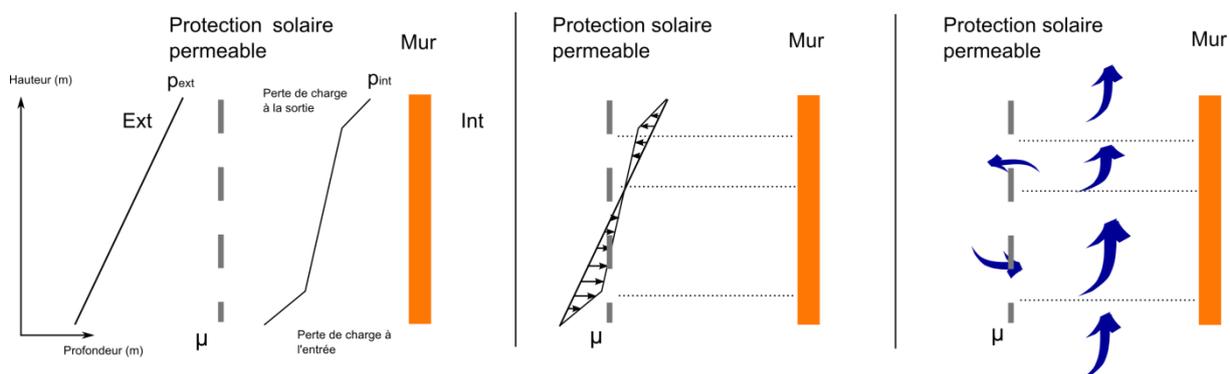


Figure 4.22 : Illustration de l'impact de la perméabilité de la protection solaire sur l'écoulement dans la lame d'air.

Le gradient thermique horizontal dans la 2^{ème} couche de plâtre (figure 4.21) est moins bien prédit que pour les autres cas de protections solaires. On retrouve bien la phase de charge pendant la journée et de décharge pendant la nuit. Les valeurs des gradients thermiques horizontaux sont élevés ce qui s'explique par le caractère partiellement transparent du métal déployé. C'est la géométrie des mailles qui implique que le coefficient de transmission du rayonnement en CLO est fonction de l'angle d'incidence. Or il a été considéré fixe dans ces simulations alors qu'il devrait être variable (prenant alors des valeurs plus élevées le matin et le soir qu'au milieu de la journée). C'est ce point qui explique en partie les différences dans les pics de densité de chaleur.

Là encore comme pour tous les autres cas présentés, la nuit, la décharge du mur est sous-estimée, ce qui doit être attribué au coefficient de convection entre l'air de la lame d'air et le Mur, associé à la convection forcée due au vent qui n'est pas évalué.

4.3.3.4 Conclusion

Tout d'abord, le modèle PdC+ s'applique aussi bien au cas de l'EPLM équipé d'un bardage aggloméré avec une lame d'air de 33 mm que pour une lame d'air de 66 mm. Dans les deux cas, les prédictions des vitesses d'écoulement de l'air et du gradient vertical de température d'air dans la lame d'air sont très bonnes. Et la prédiction de la densité de flux de chaleur dans le Mur est bonne, mais la décharge de chaleur du mur est sous-estimée la nuit.

Ce constat que la densité de flux de chaleur du Mur vers la lame d'air est sous-estimée la nuit, a été retrouvé pour les cas du store et du métal déployé avec une lame d'air de 100 mm. La généralisation de cette différence concorde bien avec l'explication donnée au paragraphe 4.2.1.5 : la nuit, l'écoulement de l'air dans la lame d'air est principalement dû à l'effet du vent extérieur. Or si la vitesse de celui-ci est bien approximée, l'effet qu'il a sur les échanges convectifs entre l'air de la lame d'air et le Mur ne sont pas pris en compte. C'est ce point qui mène alors à la sous-estimation de la décharge du mur la nuit.

Pour le store, les résultats obtenus sont très concluants. Comme nous l'avons fait remarquer, la transparence partielle du store au rayonnement en CLO ajouté au fait qu'il absorbe et conduit une grande partie du flux radiatif incident, implique que le flux de chaleur vers la lame d'air est élevé. C'est pourquoi, au cours de la journée, le gradient vertical de température d'air dans la lame d'air et la vitesse d'air sont élevés : ils traduisent la forte évacuation de chaleur par transport convectif.

Pour le métal déployé, les résultats sont moins concluants. Tout d'abord, la transparence du métal déployé est moins bien quantifiée. En effet, pour des raisons géométriques, celle-ci est variable en fonction de la hauteur du soleil, alors qu'elle est dans nos calculs considérée constante. Pour cette raison l'apport de chaleur dans la lame d'air la journée est mal évalué. Il faut noter que l'amélioration à apporter au modèle pour prendre en compte ce point est relativement facile à mettre en place, mais nécessite une meilleure caractérisation du coefficient de transmission du métal déployé.

Ensuite, le modèle PdC+ considère que l'écoulement dans la lame d'air est purement vertical. Or nous avons expliqué schématiquement pourquoi ceci n'est plus vrai pour une protection solaire fortement perméable où des mouvements de convection horizontaux altèrent la forme de l'écoulement vertical. Pour ces raisons les prédictions du gradient vertical de température dans la lame d'air et le gradient thermique horizontal dans le mur sont assez approximatives pour le cas du métal déployé.

4.4 Conclusions

Les trois modèles d'écoulement présentés au chapitre 3 ont été implémentés dans le modèle général de description des transferts de chaleur à l'échelle de l'EPLM. Les prédictions ont alors été comparées aux mesures. Pour cela, nous nous sommes intéressés à la vitesse d'écoulement dans la lame d'air, au gradient vertical de température d'air dans la lame d'air et au gradient thermique horizontal dans le Mur.

Certaines limites constatées pour le modèle par calculs CFD de Gan (2011) font que nous l'écartons. En effet, son domaine de validité est limité, les corrélations étant établies pour le cas où le flux de chaleur vers la lame d'air est positif. L'adaptation au cas plus général entraîne alors des discontinuités dans les prédictions.

Les modèles dits de « Ong » et « PdC » donnent des résultats relativement proches, ce qui s'explique par leurs similarités. Les deux permettent de bien prédire la vitesse d'écoulement de l'air dans la lame d'air et le gradient vertical de température d'air dans la lame d'air. Cependant on note une sous-estimation de la décharge du Mur la nuit. Le modèle PdC se distingue par la possibilité de prendre en compte l'effet du vent extérieur sur l'écoulement dans la lame d'air. Nous avons appelé ce modèle PdC+. La prédiction de la vitesse d'écoulement de l'air dans la lame d'air est alors améliorée, mettant bien en avant l'influence du vent. Cependant, la décharge de chaleur du mur la nuit est toujours sous-estimée. Nous l'expliquons par le fait que la nuit l'écoulement se fait essentiellement sous l'effet du vent. Or l'impact de cet écoulement sur les échanges convectifs entre le Mur et la lame d'air n'est pas pris en compte. Un travail sur cette convection mixte nocturne dans la lame d'air permettrait d'établir de meilleures corrélations pour le coefficient de convection et d'ainsi mieux estimer la décharge nocturne du mur.

Nous retenons alors ce modèle amélioré PdC+ pour la suite de l'étude. Celle-ci a porté sur l'établissement de facteur solaire des protections solaires utilisées.

Il faut aussi remarquer que nous nous sommes centrés sur les transferts de chaleur au sein du Mur, c'est-à-dire vers le bâtiment, plutôt que sur la quantification de la chaleur évacuée sur la lame d'air. Dans le cas d'étude portant sur des systèmes *Out-Int* ou *In-Out*, le terme évacué par transport convectif est déterminant, il définit en effet l'efficacité du système. Le flux de chaleur évacué est proportionnel au produit du gradient vertical de température d'air et de la vitesse d'écoulement de l'air dans la lame d'air. Or nous avons montré que le modèle PdC+ permet de bien prédire ces données, ce qui indique que la prédiction du flux de chaleur évacué est aussi bonne.

Chapitre 5 :

Exploitation du modèle

5.1 Introduction

Le modèle PdC+ présenté dans le chapitre 3 est qualifié expérimentalement dans le chapitre 4. Ainsi, la description relativement fine des transferts de chaleur qui prennent place à l'échelle de l'EPLM est bonne et possiblement intégrable dans une plateforme de modélisation de bâtiment. Cependant elle implique une complexification du modèle et est alors relativement coûteuse en temps de calcul. De plus elle ne permet pas de facilement répondre aux demandes des industriels et des architectes sur la caractérisation des performances de telles protections solaires. Enfin, son application serait plus restreinte ; elle s'applique moins bien à la caractérisation de protections solaires perméables et semi transparentes comme des plantes grimpantes qui seraient l'objectif du travail dans lequel s'inscrit cette thèse.

Le facteur solaire d'une protection solaire a été présenté dans le chapitre 3. Les méthodes de calcul du facteur solaire peuvent varier et dépendent alors de l'usage qui en est fait. Le facteur solaire est une caractérisation simple d'une protection solaire et peut alors répondre aux besoins des industriels et des architectes. De plus, son application serait la même que ce soit pour les bardages bois, les stores ou les plantes grimpantes.

Ici, nous présentons la méthode réglementaire de modélisation des apports thermiques par une paroi opaque qui permet de prendre en compte un possible bardage placé devant celle-ci. Cette méthode s'appuie notamment sur le calcul du facteur solaire de paroi opaque et de protection solaire.

Une autre méthode de calcul du facteur solaire est celle présentée au paragraphe 3.3.2.3. Le modèle PdC+ ici développé permet de l'appliquer. Ce facteur solaire permet alors de caractériser la protection solaire et notamment son impact sur le comportement d'une paroi devant laquelle est placée cette protection solaire. Nous voulons donc analyser la pertinence de l'usage d'un facteur solaire calculé de cette manière. Nous le comparerons au modèle réglementaire mais aussi au modèle PdC+ qui décrit plus généralement les transferts qui prennent place.

Enfin, nous discutons du caractère intrinsèque du facteur solaire et de sa pertinence.

5.2 Analyse de la méthode réglementaire de modélisation d'un bardage

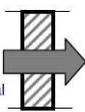
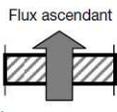
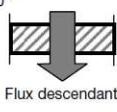
5.2.1 Présentation de la méthode réglementaire de modélisation d'un mur muni d'un bardage

La réglementation thermique (RT) 2012 française fixe une méthodologie de calcul pour la simulation thermique des bâtiments. Nous considérons la méthode dite C de calcul des consommations

d'énergie du bâtiment. Celle-ci se base sur une simulation thermique d'un bâtiment où les échanges de chaleur sont calculés par des méthodes approchées. Ainsi pour les transferts de chaleur au niveau d'une paroi opaque, les transferts conductifs, convectifs et radiatifs en GLO sont différenciés des transferts liés aux sollicitations radiatives en CLO. Les premiers sont caractérisés par un coefficient de transmission thermique de la paroi opaque calculé selon les règles Th-U. Les deuxièmes sont eux caractérisés par un facteur de transmission solaire calculé selon les règles Th-S. Nous présentons ici ces méthodes pour le cas « d'une paroi opaque avec lame d'air extérieure ventilée ».

5.2.1.1 Modification de la résistance thermique superficielle extérieure

Pour la modélisation des transferts conductifs, convectifs et radiatifs en GLO, un coefficient de transmission thermique de la paroi opaque est utilisé. Celui-ci intègre des résistances thermiques superficielles (intérieure et extérieure) qui sont définies dans les règles Th-U fascicule 4 « parois opaques ». La résistance thermique superficielle extérieure traduit les échanges de type convectifs de la face externe du mur avec l'air extérieur mais aussi les échanges radiatifs en GLO de cette face externe avec l'ENV et le ciel. Les valeurs des résistances thermiques superficielles sont fixées, et sont visibles sur la figure 5.1. Ainsi, pour une paroi verticale, la résistance thermique superficielle extérieure par défaut est $R_{se}=0,04 \text{ m}^2.\text{K/W}$ alors que la résistance thermique superficielle intérieure est $R_{si}=0,13 \text{ m}^2.\text{K/W}$. La plus faible valeur de la résistance thermique extérieure traduit le fait que les échanges de chaleur sont plus élevés du côté extérieur que du côté intérieur, ce qui correspond à la prise en compte la convection forcée due au vent extérieur.

Paroi donnant sur : - l'extérieur - un passage ouvert - un local ouvert (2)	R_{si} $\text{m}^2.\text{K/W}$	$R_{se}^{(1)}$ $\text{m}^2.\text{K/W}$	$R_{si} + R_{se}$ $\text{m}^2.\text{K/W}$
Paroi verticale inclinaison $\geq 60^\circ$ Flux horizontal 	0,13	0,04	0,17
Flux ascendant 	0,10	0,04	0,14
Paroi horizontale inclinaison $< 60^\circ$ Flux descendant 	0,17	0,04	0,21

(1) Si la paroi donne sur un autre local non chauffé, R_{se} s'applique des deux côtés.
(2) Un local est dit ouvert si le rapport de la surface totale de ses ouvertures permanentes sur l'extérieur, à son volume, est égal ou supérieur à $0,005 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Ce peut être le cas, par exemple, d'une circulation à l'air libre, pour des raisons de sécurité contre l'incendie.

Figure 5.1 : Extrait de la RT 2012, règles Th U fascicule 4 « parois opaques » qui précise les valeurs des « résistances thermiques de parois donnant sur l'extérieur »

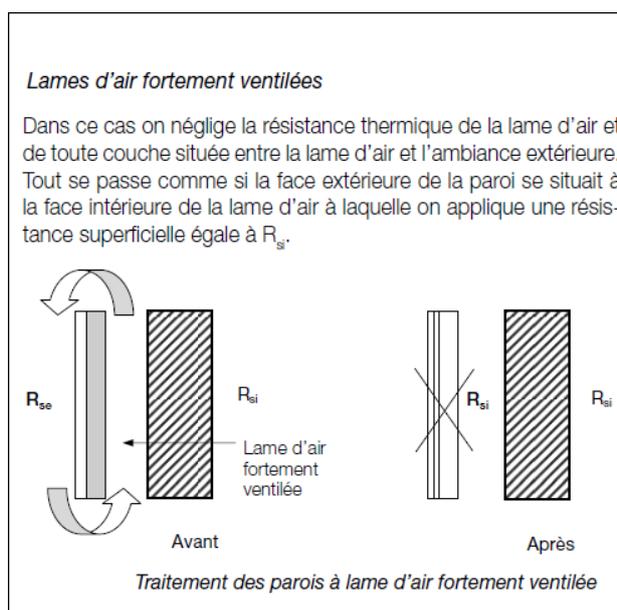


Figure 5.2 : Extrait de la RT 2012, règles Th U fascicule 4 « parois opaques » qui précise la méthode de prise en compte des parois fortement ventilées

L'extrait de la réglementation thermique précisant la méthode de prise en compte d'un bardage apparaît sur la figure 5.2. Pour la prise en compte d'un bardage, la réglementation thermique impose de considérer le mur nu, sans bardage. L'effet du bardage est ajouté par modification de la résistance thermique extérieure, prise égale à la résistance thermique intérieure. Ce choix de modélisation traduit le fait que l'on considère que le bardage protège le Mur nu, et crée un espace où les

mouvements de convection sont moindres, et sont comparables à ceux entre la surface interne du mur et la zone intérieure, et où la température d'air est la même que la température d'air extérieur.

5.2.1.2 Calcul du facteur solaire de la protection solaire

Il faut préciser qu'à la différence des règles Th-U utilisées plus haut, les règles Th-S ne s'appuient pas sur des normes spécifiques.

5.2.1.2.1 Facteur solaire d'une paroi opaque

La méthode de détermination des besoins d'énergie d'un bâtiment de la réglementation thermique repose sur un bilan d'énergie d'une zone intérieure avec un calcul direct des échanges de chaleur. Ainsi, l'apport de chaleur par une paroi opaque induit par les sollicitations radiatives en CLO est calculé comme pour une paroi vitrée, en introduisant un facteur solaire qui multiplie le flux solaire incident sur la paroi opaque. Les apports de chaleur vers la zone intérieure du aux sollicitations

$$\varphi_{CLO,RT} = f_{smur,RT} * I_s \quad (E 5.1)$$

Où

$\varphi_{CLO,RT}$ est la densité d'apport de chaleur lié aux sollicitations radiatives en CLO sur les parois opaques

$f_{smur,RT}$ est le facteur solaire de la paroi opaque calculé selon les règles Th-S, qui se calcule selon l'équation (E 5.2) :

$$f_{smur,RT} = \alpha_{mur} * \frac{R_{se}}{R_{si} + R_{mur} + R_{se}} \quad (E 5.2)$$

Où

R_{se} est la résistance thermique superficielle extérieure de la paroi opaque calculée selon les règles Th-U

R_{si} est la résistance thermique superficielle intérieure de la paroi opaque calculée selon les règles Th-U

R_{mur} est la résistance thermique du mur calculée selon les règles Th-U

α_{mur} est le coefficient d'absorption solaire de la paroi opaque

Le facteur solaire du mur calculé selon l'équation (E 5.2) ne dépend pas de l'emplacement de la couche isolant. Or nous savons que si la couche isolante est vers l'extérieur de la paroi, alors l'échauffement est plus grand sur la face externe du mur ce qui favorise les échanges de chaleur avec l'air extérieur et l'environnement, permettant ainsi une meilleure décharge du mur. Ainsi, une paroi opaque avec une isolation par l'extérieur devrait avoir un facteur solaire plus faible qu'une paroi avec isolation du côté intérieur.

Appliquons l'équation (E 5.2) au Mur de l'EPLM pour calculer son facteur solaire de paroi opaque. Nous utilisons les propriétés des matériaux données au tableau 2.1, au chapitre 2 et la géométrie de

l'EPLM présentée sur la figure 2.2 au chapitre 2. La résistance thermique superficielle extérieure est celle donnée par les règles Th-U, c'est-à-dire $R_{se}=0,04 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. Ainsi le facteur solaire de paroi opaque du Mur du système EPLM calculé selon la Réglementation Thermique est :

$$f_{S_{M,RT}} = 1,86 \%$$

5.2.1.2.2 Facteur solaire d'une paroi opaque avec lame d'air extérieure ventilée

La réglementation considère le cas « d'une paroi opaque verticale avec une lame d'air extérieure ventilée ». Pour prendre en compte l'effet de la protection solaire qui délimite une telle lame d'air extérieure ventilée, les règles Th-S proposent un coefficient de pondération basé sur des valeurs tabulées. Il faut remarquer que cette méthode ne s'applique qu'aux protections solaires opaques, nous ne considérons donc ici que les deux bardages bois opaques.

Le facteur solaire total de la paroi opaque avec lame d'air extérieure ventilée s'écrit alors selon l'équation (E 5.3). Les notations apparaissent sur le schéma de la figure 5.3.

$$f_{SEPLM,RT} = \chi_P * \alpha_{mur} * \frac{R_{se}}{R_{si} + R_{mur} + R_{se}} \quad (\text{E 5.3})$$

Où χ_P est un coefficient de correction associé à la prise en compte de la lame d'air extérieure ventilée. Il dépend de la hauteur de la lame d'air et de la largeur minimale des ouvertures en partie hautes et basses de la lame d'air. Le tableau indiquant les valeurs de ce coefficient de correction est reproduit ici dans la figure 5.3.

Il faut remarquer qu'à la lecture de cette table, nous pouvons nous demander pourquoi ce facteur solaire diminue quand l'absorptivité de la protection augmente. Une protection plus claire (faible absorptivité) réfléchit une plus grande proportion du rayonnement incident, et donc son facteur solaire devrait diminuer. Nous considérons alors les valeurs de la colonne d'absorptivité égale à 0,8 pour les deux bardages.

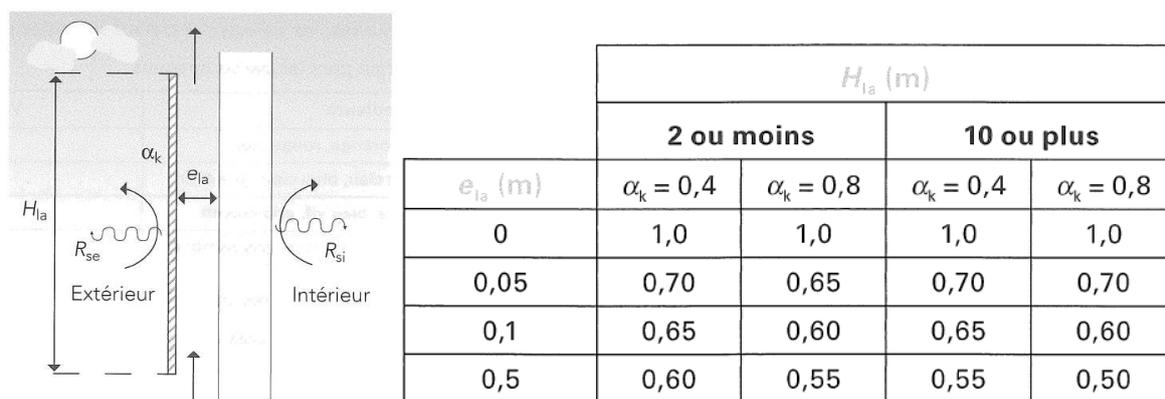


Figure 5.3 : Extraits de la RT 2012, règles Th S, schéma descriptif et tableau donnant les valeurs du coefficient de correction pour le cas des lames d'air verticales ventilées sur l'extérieur

Les règles Th-S ne le précisant pas, pour les configurations géométriques non référencées dans cette table, nous calculerons la valeur par interpolation entre les valeurs les plus proches. Les valeurs du coefficient de correction calculées de cette manière pour les trois épaisseurs de lame d'air considérées, pour un coefficient d'absorption du mur de 0,8 et pour une hauteur de mur de 2,5 m, apparaissent dans le tableau 5.1.

	e _{la} 33 mm	e _{la} 66 mm	e _{la} 100 mm
χ_P	0,769	0,634	0,6

Tableau 5.1 : Valeurs du coefficient de correction adapté des protections solaires étudiées selon l'épaisseur de lame d'air

Le facteur solaire de la paroi opaque sans la protection solaire a été donné plus haut et vaut 1,86 %. Nous l'utilisons pour calculer le facteur solaire de paroi opaque avec lame d'air extérieure ventilée $f_{SEPLM,RT}$ pour les deux bardages étudiés selon l'équation (E 5.3). Ces valeurs sont données dans le tableau 5.2.

$f_{SEPLM,RT}$	e _{la} 33 mm	e _{la} 66 mm	e _{la} 100 mm
pin aggloméré	0,0143	0,0118	0,01115
pin brut	0,0143	0,0118	0,01115

Tableau 5.2 : Valeurs du coefficient de correction des protections solaires étudiées selon l'épaisseur de lame d'air

5.2.2 Analyse

La réglementation thermique impose une méthode de modélisation des bardages. De manière à ne pas changer les modèles de transferts dans les parois solides, l'idée est de considérer le mur nu sans le bardage, mais de modifier les conditions aux limites extérieures. La modification de la sollicitation extérieure se fait alors en majorant la résistance thermique superficielle extérieure et en modifiant le facteur solaire.

Il faut remarquer que ce choix de méthode, comme toute la modélisation de la réglementation thermique, ne prend pas en compte les capacités thermiques des matériaux et donc l'inertie de la paroi. Nous allons évaluer plus loin l'impact de ces points.

5.3 Calcul du facteur solaire total avec le modèle PdC+

5.3.1 Objectif et méthode

Nous voulons proposer une méthode alternative à celle de la réglementation thermique pour la modélisation d'une protection solaire devant une paroi. La réglementation thermique fait notamment le choix de seulement considérer le mur sans la protection solaire afin ne pas complexifier la modélisation générale des parois.

De manière à proposer une modélisation facilement implémentable dans les plateformes de simulation thermique dynamique de bâtiment, nous conservons l'idée d'uniquement considérer le Mur nu pour la modélisation de l'enveloppe thermique. Pour prendre en compte l'effet de la Protection solaire, nous souhaitons agir que par modification de la sollicitation extérieure.

Nous calculons donc ici le facteur solaire des protections solaires en utilisant la méthode présentée au paragraphe 3.3.2.3 du chapitre 3. Le modèle EPLM avec l'approche par perte de charge (PdC+) pour la modélisation de l'écoulement de l'air dans la lame d'air est considéré. Nous réalisons alors des simulations en fixant la température d'air de la zone intérieure, et utilisons les besoins de chauffage et de rafraîchissement nécessaires pour maintenir cette température afin de déterminer les flux entrants dans la zone intérieure du bâtiment. Ces simulations doivent aussi être réalisées en l'absence de flux radiatif en CLO. Puis nous utilisons l'équation (E 3.34) pour le calcul du facteur solaire de la paroi munie de la protection solaire.

Enfin nous utilisons le modèle de mur nu, et appliquons cette même démarche pour calculer le facteur solaire du Mur seul. Nous pouvons alors en déduire le facteur solaire de la protection solaire en utilisant l'équation (E 3.33).

5.3.2 Réalisation des calculs

5.3.2.1 Facteur solaire du Mur nu

Le facteur solaire du Mur nu est obtenu en utilisant le modèle de Mur nu qui prend en compte les échanges en GLO avec l'ENV et le ciel en recalculant les coefficients d'échanges à chaque pas de temps et avec un coefficient d'échange convectif de la surface externe du mur avec l'air extérieur calculée en fonction de la vitesse de vent selon l'équation (E 3.4).

Plusieurs simulations sont réalisées pour les séquences de mesures 2, 4 et 7 du tableau 2.2. Nous utilisons les charges de chauffage et de rafraîchissement correspondantes pour calculer le facteur solaire selon l'équation (E 3.34). Le facteur solaire retenu est la moyenne des facteurs solaires calculés pour chacune des séquences 2, 4 et 7. Le facteur solaire final ainsi calculé a pour valeur 0,0345, soit 3,45 %.

5.3.2.2 Facteur solaire des protections solaires

Nous appliquons maintenant la même méthodologie de calcul de facteur solaire, réalisée au paragraphe précédent pour le mur nu, aux différentes configurations caractérisées par les épaisseurs de lame d'air et la protection solaire. Ici, c'est le modèle PdC+ qui est utilisé. Nous en déduisons alors le facteur solaire total de l'EPLM, c'est-à-dire du mur équipé de la protection solaire. Puis nous utilisons l'équation (E 3.33) pour déterminer le facteur solaire de la protection solaire.

Les facteurs solaires ainsi calculés pour les différentes protections solaires et épaisseurs de lame d'air apparaissent dans le tableau 5.3.

Facteur solaire	e 33 mm	e 66 mm	e 100 mm
pin brut	0,0846	0,0736	0,0722
pin aggloméré	0,2011	0,1722	0,1758
store	0,3235	0,3183	0,2709
métal déployé	0,3758	0,3246	0,3465

Tableau 5.3: Tableau donnant les facteurs solaires calculés pour les différentes protections solaires étudiées et les différentes épaisseurs de lame d'air

Nous retrouvons le fait que c'est le bardage brut-clair qui limite le plus les apports de chaleur. On remarque aussi que pour les deux types de bardage bois et pour le store, que le facteur solaire diminue quand l'épaisseur de lame d'air augmente.

Pour une même quantité de chaleur évacuée par transport convectif, la vitesse d'écoulement est d'autant plus faible que l'épaisseur est grande (en effet, c'est le débit massique qui se conserve). Si la vitesse est plus faible alors le gradient vertical de température est plus faible, et le coefficient de convection entre l'air de la lame d'air et le Mur est lui aussi plus faible limitant les apports vers le Mur.

5.3.2.3 Résistance thermique extérieure

La modélisation de l'EPLM par le Mur nu en pondérant les apports solaires par le facteur solaire ne permet pas de décrire l'impact du bardage sur les échanges convectifs et radiatifs en GLO dans la lame d'air. Comme la réglementation thermique, nous proposons de traduire cet effet par la modification de la résistance thermique superficielle extérieure.

Ainsi nous calculons la résistance thermique superficielle équivalente entre la surface externe du mur et le nouvel environnement extérieur. Nous la définissons en égalisant le bilan des flux sur la face externe du mur avec un échange fictif avec l'air extérieur. En reprenant les notations et la forme du bilan d'énergie réalisé sur la face interne de la protection solaire au paragraphe 3.1.2.5.2 du chapitre 3, la résistance thermique superficielle équivalente $R_{se,eq}$ est définie telle que dans l'équation (E 5.4).

$$\frac{1}{R_{se,eq}}(T_{ext} - T_{M_{o,m}}) = h_{cv,la}(T_{Lm} - T_{M_{o,m}}) + h_{GLO,la}(T_{P_{i,m}} - T_{M_{o,m}}) \quad (E 5.4)$$

Nous calculons cette résistance superficielle équivalente à chaque pas de temps puis moyennons sa valeur. Les valeurs obtenues pour les bardages sont données dans le tableau 5.4.

	R_{eq}
Pin brut	0,17
Pin aggloméré	0,13

Tableau 5.4 : besoins de rafraîchissement cumulés sur la première journée de la séquence n°2 calculés pour les 4 modèles

Les résistances thermiques superficielles ainsi calculées apparaissent très proches de la résistance thermique superficielle proposée par la réglementation thermique. Nous notons que la valeur de la résistance thermique superficielle associée au bardage brut-clair est plus élevée que celle associée au pin aggloméré. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'écoulement vertical prenant place derrière le pin aggloméré est plus élevé que derrière le pin brut, favorisant l'échange convectif de la surface externe du mur avec l'air de la lame d'air.

5.3.3 Application au cas des bardages bois

5.3.3.1 Méthodologie de comparaison

Nous avons présenté le modèle PdC+ de modélisation des transferts de chaleur au sein de l'EPLM, et montré dans ce chapitre que les prédictions réalisées sont de bonnes qualités. Des améliorations concernant la prise en compte de l'effet du vent extérieur sur la convection dans la lame d'air pourraient néanmoins prises en compte. Nous avons ensuite présenté le modèle réglementaire que nous appellerons ici modèle RT. Enfin, nous avons proposé une méthode de calcul d'un facteur solaire de protection solaire en utilisant le modèle PdC+ avec comme objectif d'utiliser ce facteur solaire dans une plateforme de simulation thermique de bâtiment, sans avoir à changer le modèle existant de paroi opaque.

Nous voulons maintenant comparer les prédictions de ces trois modèles ainsi qu'un modèle de mur ne prenant pas en compte les potentielles protections solaires. Nous le faisons, ci-après, à titre d'illustration, pour les cas des deux bardages bois, c'est-à-dire le bardage aggro-rouge et en pin brut, pour une épaisseur de lame d'air de 33 mm. Les 4 modèles utilisés sont donc les suivants :

- Mur sans prise en compte du bardage. Les coefficients convectifs et radiatifs extérieurs sont calculés à chaque pas de temps. Modèle «ref »
- méthode réglementaire « RT »
- modèle « PdC+ »
- modèle de mur référence en modifiant les apports solaires avec le facteur solaires calculés au paragraphe 4.5.2 « ref + f_s »

Afin de pouvoir comparer les modèles, nous considérons toujours la même composition de l'EPLM pour la séquence météorologique n°2 du tableau 2.2. Nous définissons un thermostat de température d'air intérieur à 20°C et nous comparons alors la puissance de rafraîchissement calculée selon chaque modèle. Ce thermostat est volontairement choisi bas de telle manière à mettre mieux en avant les apports de chaleur au volume d'air intérieur du bâtiment.

5.3.3.2 Comparaison pour bardage pin aggloméré et lame d'air de 33 mm

Dans cette configuration les facteurs solaires issus du calcul réglementaire et calculés avec le modèle PdC+, ainsi que la résistance thermique superficielle équivalente sont les suivant :

- Facteur solaire réglementaire : 0,0143
- Facteur solaire PdC+ : 0,0846
- Résistance thermique superficielle équivalent : 0,17 m².K/W

Sur la figure 5.4 les évolutions des puissances de rafraîchissement de la zone intérieure pour maintenir l'air à 20°C sont tracées pour les 4 modèles étudiés, dans le cas d'un bardage aggro-rouge, lame d'air d'épaisseur 33 mm, pour la séquence n°2.

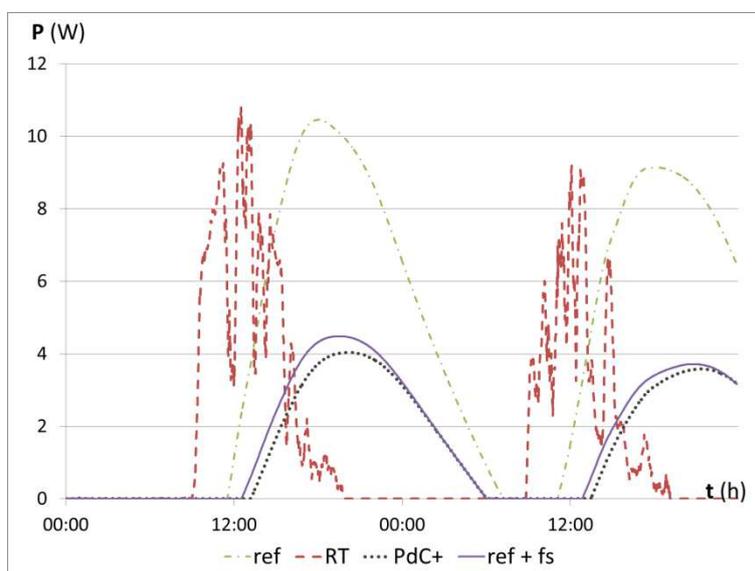


Figure 5.4 : Evolution de la puissance de rafraîchissement de la zone intérieure pour les 4 modèles sélectionnés, cas du bardage aggro-rouge, séquence n°2. En tirets-points verts, référence, en tirets rouge, RT, en points noirs, PdC+, en ligne violette, référence + f_s .

La puissance de rafraîchissement calculée selon la méthodologie de la réglementation thermique française, se distingue très nettement des trois autres puissances calculées. En effet, dans ce cas le terme utilisé est le facteur solaire de l'ensemble du complexe, c'est-à-dire de la paroi opaque avec la lame d'air extérieure ventilée. L'apport radiatif en CLO se fait donc directement vers la zone intérieure, ce qui explique le fait que l'on retrouve exactement les variations de la densité de flux radiatif en CLO incident sur le mur au facteur solaire près.

Ensuite, les évolutions des trois autres puissances sont lissées par l'inertie du mur. La puissance du cas de référence est la plus élevée, ce qui s'explique par le fait que dans ce cas, la protection solaire n'est pas considérée.

Le cas « ref+fs » qui utilise le modèle de référence en modifiant la résistance thermique superficielle extérieure et en utilisant le facteur solaire calculé à l'aide du modèle PdC+ permet de bien approximer la puissance calculée par le modèle PdC+. Ceci valide donc la méthodologie de modélisation reposant sur la modification de la résistance thermique extérieure et de l'usage du facteur solaire. Cette méthode serait donc facilement implémentable dans une plateforme de simulation thermique dynamique qui a un modèle de mur avec prise en compte des capacités et qui ne prend pas en compte l'impact de potentiels bardages.

Afin de mieux de mieux évaluer la qualité de la prédiction, nous avons calculé le besoin de rafraîchissement cumulé sur la première journée. La deuxième journée n'est pas considérée car comme nous pouvons le voir (figure 5.4) l'inertie du mur entraîne un déphasage de la puissance de rafraîchissement par rapport à la sollicitation, et la charge de rafraîchissement serait alors sous estimée. Ainsi les besoins sont donnés dans le tableau 5.5 suivant.

	ref	RT	PdC+	ref + fs
Q clim (Wh)	118,31	49,25	42,40	48,10

Tableau 5.5 : besoins de rafraîchissement cumulés sur la première journée de la séquence n°2 calculés pour les 4 modèles

Nous retrouvons la bonne approximation des besoins de rafraîchissement par le modèle « ref+fs » sur le tableau 5.5 Il faut noter que la RT donne aussi de bon résultat, mais comme nous l'avons vu c'est avant tout l'évolution dans le temps qui est mauvaise.

5.3.3.3 Comparaison pour bardage pin brut et lame d'air de 33 mm

Dans cette configuration les facteurs solaires issus du calcul réglementaire et calculés avec le modèle PdC+, ainsi que la résistance thermique superficielle équivalente sont les suivant :

- Facteur solaire réglementaire : 0,0143
- Facteur solaire PdC+ : 0,2
- Résistance thermique superficielle équivalent : 0,13 m².K/W

Sur la figure 5.5 les évolutions des puissances de rafraîchissement de la zone intérieure pour maintenir l'air à 20°C sont tracées pour les 4 modèles étudiés, dans le cas d'un bardage brut-clair, lame d'air d'épaisseur 33 mm, pour la séquence n°2.

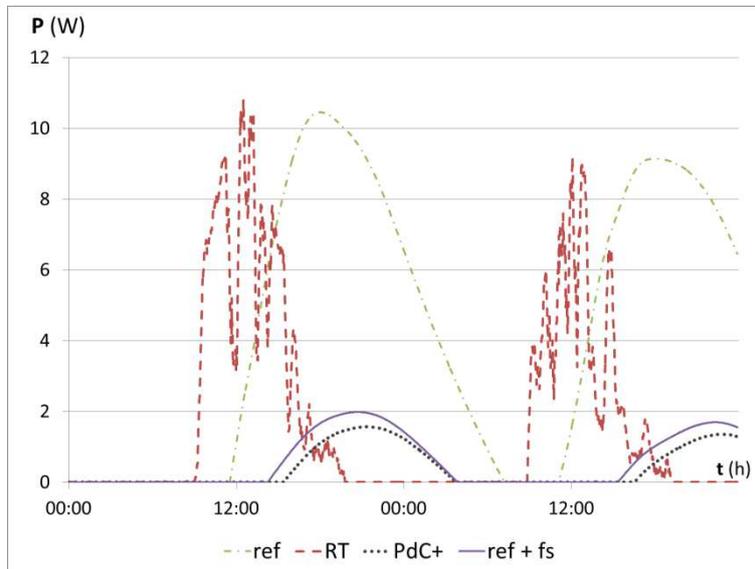


Figure 5.5 : Evolution de la puissance de rafraîchissement de la zone intérieure pour les 4 modèles sélectionnés, cas du bardage brut-clair, séquence n°2. En tirets-points verts, référence, en tirets rouge, RT, en points noirs, PdC+, en ligne violette, référence + fs.

Nous notons sur la figure 5.5 que l'évolution de la puissance calculée selon la RT est la même que pour le cas précédent et que celle-ci est très largement supérieure à la puissance évaluée par les modèles « PdC+ » et « ref+fs ». Nous avons vu au paragraphe 5.2.1.2.2 que les valeurs des facteurs solaires de la paroi opaque avec lame d'air extérieure ventilée sont indépendantes du type de protection solaire opaque. Ainsi les facteurs solaires totaux donnés dans le tableau 5.2 pour la configuration avec bardage aggro-rouge et bardage brut-clair, sont les mêmes. Les facteurs solaires étant les mêmes, il est alors normal de retrouver exactement la même évolution de puissance calculée par la RT dans la figure 5.5 que dans la figure 5.4.

Les puissances de rafraîchissement calculées par les modèles « PdC+ » et « ref+fs » sont très proches et nettement plus faible que celle calculée par la RT.

Les besoins de rafraîchissement cumulés sur la première journée sont donnés dans le tableau 5.6 suivant.

	ref	RT	PdC+	ref + fs
Q clim (Wh)	118,31	49,25	12,60	17,30

Tableau 5.6 : besoins de rafraîchissement cumulés sur la première journée de la séquence n°2 calculés pour les 4 modèles

Alors que pour le bardage aggro-rouge, le besoin de rafraîchissement calculé par la méthode de la réglementation thermique approchait bien les besoins calculés par les modèles « PdC+ » et « ref+fs », ce n'est ici pas le cas. Le modèle générique proposé par la réglementation thermique trouve dans ce cas ses limites.

Notons que nous avons expliqué dans le paragraphe 4.3.2.1.5 du chapitre précédent que le modèle PdC+ surestime les apports de chaleur de manière générale. Ainsi les besoins cumulés de rafraîchissement devraient être plus faibles et les facteurs solaires aussi.

5.3.4 Conclusions

La définition du facteur solaire pour un élément de protection solaire issu de la norme EN ISO 9288 :1989 a été présentée au paragraphe 3.3.2.1. Nous avons vu qu'il existait alors différentes

méthodes de calcul. La réglementation thermique française considère toutes les parois opaques comme de telles protections solaires et en calcule alors le facteur solaire. Un bardage placé devant une paroi est modélisé comme un coefficient de correction, ce qui là aussi s'apparente à un facteur solaire. Ce coefficient de correction se lit dans des tables de valeur en fonction de certaines propriétés de la protection solaire. Nous avons présenté un algorithme de calcul issu de Hellstrom *et al.* (2007) qui permet de calculer le facteur solaire d'une protection solaire placée devant une paroi. Nous avons appliqué cet algorithme de calcul en utilisant le modèle PdC+ pour calculer le facteur solaire des deux bardages bois ici étudiés.

Ensuite, nous avons alors comparé les différents modèles de l'ELPM, notamment le modèle de la réglementation, thermique, le modèle 1D amélioré PdC+ présenté dans le chapitre 3 et enfin un modèle classique de paroi avec des sollicitations extérieures paramétrisées avec notamment une résistance thermique superficielle extérieure majorée et un facteur solaire. Nous avons alors vu que la modélisation « ref+fs » permettait de bien approcher le comportement du mur lors de fortes sollicitations solaires comparativement au modèle PdC+.

Il faut remarquer que l'algorithme de calcul de facteur solaire de Hellstrom *et al.* (2007) fait intervenir le Mur considéré. Nous pouvons donc nous demander si la valeur du facteur solaire est intrinsèque à la protection solaire considérée et s'il ne dépend donc pas de la méthode de calcul, du Mur associée ou d'autres paramètres. Nous discutons du caractère intrinsèque du facteur solaire dans le paragraphe suivant.

5.4 Discussion sur le caractère intrinsèque du facteur solaire

Le caractère intrinsèque du facteur solaire est assuré si le facteur solaire ainsi calculé ne dépend que de la protection solaire et de ses propriétés, c'est-à-dire des paramètres internes et ne dépend pas de paramètres externes comme la méthode de calcul ou la paroi associée à la protection solaire. Nous nous proposons donc de vérifier la sensibilité du facteur solaire à ces paramètres externes afin d'évaluer le caractère intrinsèque du facteur solaire de la protection solaire. Ces paramètres externes sont ici en partie listés :

- Les paramètres associés à la méthode de calcul du facteur solaire :
 - o Le choix de la température de thermostat, ici pris à 20°C, paragraphe 3.3.2.3
 - o Les sollicitations extérieures données par le fichier météorologique
- Les paramètres associés à la configuration du système étudié :
 - o A l'épaisseur d'isolant et son placement
 - o A l'inertie thermique du mur
- Les paramètres associés au bâtiment qui intègre l'EPLM

5.4.1 Sensibilité aux paramètres de calcul du facteur solaire

5.4.1.1 Sensibilité au thermostat

Dans la méthode de calcul du facteur solaire présentée au paragraphe 3.3.2.3, le thermostat qui fixe l'ambiance intérieure a été fixé arbitrairement à 20°C.

Nous calculons le facteur solaire des trois protections solaires pour lesquels le modèle PDC+ a été qualifié expérimentalement en faisant varier la température de thermostat. Les résultats sont tracés sur la figure 5.6.

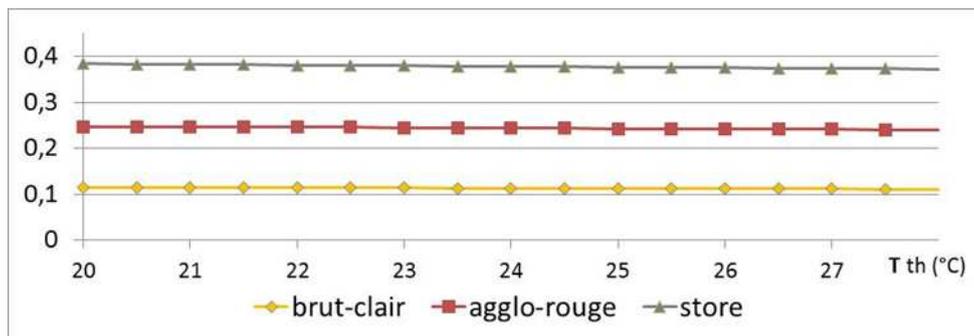


Figure 5.6 : Les facteurs solaires des trois protections solaires (bardages brut-clair et aggro-rouge et le store) calculés pour des valeurs de thermostat entre 20 et 28 °C.

Nous pouvons voir sur la figure 5.6 que la sensibilité du facteur solaire au thermostat est très faible. En effet, la différence entre les facteurs solaires calculés pour un thermostat de 20°C et un thermostat de 28°, ce qui correspond au cas le plus défavorable, est inférieure à 2%.

5.4.1.2 Sensibilité à la sollicitation extérieure

Nous considérons le bardage aggro-rouge pour une lame d'air de 33 mm et la configuration de l'EPLM. Nous utilisons alors les 9 relevés météorologiques du tableau 2.2 pour calculer le facteur solaire. Les valeurs ainsi obtenues sont reportées dans la figure 5.7.

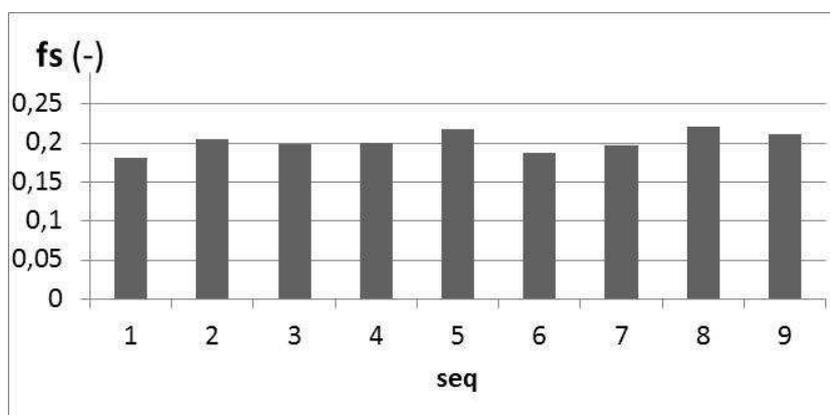


Figure 5.7 : Le facteur solaire du bardage aggro-rouge pour une lame d'air de 33 mm calculé selon les 9 séquences météorologiques du tableau 2.2

Nous pouvons voir sur la figure 5.7 que le facteur solaire du bardage aggro-rouge prend des valeurs toujours proches de 0,2 selon la séquence utilisée mais on note des variations jusqu'à 10% entre deux séquences différentes. Il faut remarquer que les fichiers météorologiques sont de 2 jours. Ainsi sur des fichiers de plus longue durée, les différences seraient plus moyennées.

Cependant nous avons utilisé que des séquences correspondantes à une sollicitation radiative d'orientation sud. Il serait alors intéressant de voir quel est le facteur solaire pour des séquences bien distinctes comme pour des orientations est ou ouest.

5.4.2 Sensibilité aux paramètres associés à la configuration du système étudié

La composition du mur peut être très variée. Nous faisons ici le choix d'analyser deux paramètres, d'abord l'épaisseur d'isolant et ensuite l'épaisseur de la couche de béton dans les configurations d'isolation thermique par l'intérieur ITI et d'isolation thermique par l'extérieur ITE. En effet, le premier définit très fortement la résistance thermique du Mur, et le deuxième son inertie thermique.

5.4.2.1 Sensibilité à l'épaisseur et à l'emplacement de l'isolant

Les valeurs issues du calcul du facteur solaire en faisant varier l'épaisseur d'isolant entre 1 et 5 cm dans les configurations ITI et ITE et pour une couche de béton de 10 cm apparaissent sur la figure 5.8.

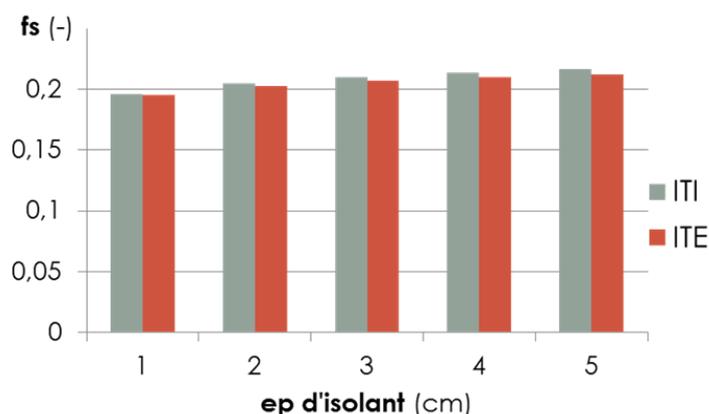


Figure 5.8 : Les valeurs du facteur solaire du bardage aggro-rouge calculé pour une épaisseur d'isolant variable, dans les configurations ITI et ITE.

Nous pouvons voir sur la figure 5.8 que pour les cas ITI et ITE, la variation de l'épaisseur d'isolant induit une très faible variation du facteur solaire. Cette variation est inférieure à 3% entre les cas où l'épaisseur d'isolant en ITE est de 2 et 5 cm.

De plus, pour une même épaisseur d'isolant, l'emplacement de l'isolant sur la face externe ou interne du Mur induit là encore une très faible variation sur le facteur solaire de la protection solaire calculée.

5.4.2.2 Sensibilité à l'épaisseur et à l'emplacement de la couche de béton

Nous faisons ici varier l'épaisseur de la couche de béton et ainsi l'inertie thermique du Mur. La protection solaire est le bardage aggro-rouge avec une lame d'air de 33 mm et une épaisseur d'isolant de 5 cm placé soit du côté intérieur (ITI) soit du côté extérieur (ITE). Les valeurs du facteur solaire de la protection solaire ainsi calculé apparaissent sur la figure 5.9.

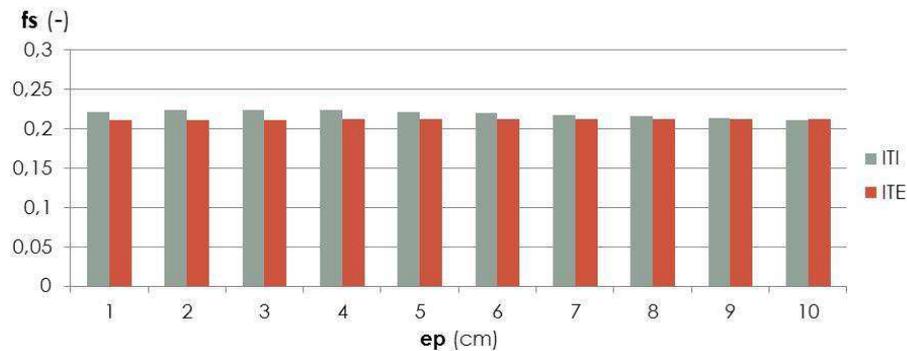


Figure 5.9 : Le facteur solaire du bardage aggro-rouge calculé pour une épaisseur de la couche de béton variable, dans les configurations ITI et ITE.

Nous pouvons voir sur la figure 5.9 que les variations des valeurs prises par le facteur solaire dans les différentes configurations restent faibles et qu'elles sont sensiblement les mêmes selon que l'isolant est placé côté intérieur ou extérieur.

5.4.2.3 Conclusions

Nous avons vu que le facteur solaire d'une protection solaire comme un bardage bois ne dépendait pas des paramètres de la méthode de calcul et dépendait faiblement de la composition du Mur associé. Pour évaluer plus en avant si le facteur solaire est une caractéristique intrinsèque de la protection solaire, l'analyse devrait être plus poussée. Ceci peut être fait en considérant plus de scénarios météorologiques ou de configurations de parois. Il faudrait aussi considérer le reste de la zone thermique associée au système EPLM. En effet, des apports solaires par d'autres éléments de l'enveloppe pourraient perturber le comportement de l'EPLM. Ces configurations devraient aussi être analysées.

5.5 Discussion sur la pertinence du facteur solaire

Nous avons vu que l'usage du facteur solaire associé à une modélisation classique de parois était une alternative à un modèle fin de transferts dans l'EPLM dont le modèle PdC+ est un exemple. En effet, la quantité de chaleur transmise à la zone thermique est bien évaluée par un modèle de mur classique dont les apports solaires sont pondérés par le facteur solaire.

Il faut remarquer que le facteur solaire s'adresse avant tout au concepteur et à l'utilisateur de protections solaires, c'est-à-dire aux industriels et architectes.

L'industriel a besoin d'une caractérisation indépendante du bâtiment qui correspond à un cadre normatif pour valoriser son produit. Le facteur solaire répond bien à ce besoin. De plus, le modèle PdC+ permet de réaliser des études de dimensionnement de protections solaires. En effet, il est possible de poser un problème en définissant des objectifs (comme la minimisation des apports solaires par la paroi), des contraintes (comme une plage d'absorptivité correspondant à des peintures ou des résistances thermiques) et alors d'appliquer des méthodes d'optimisation pour calculer la ou les solutions les plus adaptées.

L'architecte évolue avec des exigences temporelles fortes et dans une démarche globale de conception. Le facteur solaire permet de caractériser la protection solaire indépendamment du bâtiment, ce qui est alors d'une grande aide notamment dans la possibilité de comparer simplement et rapidement l'impact de différentes protections solaires.

Le facteur solaire est donc une caractéristique utile en phase amont d'un travail de conception de bâtiment, car elle est aisément appréhendable et facilite la réflexion générale sur l'enveloppe solaire. Toutefois dans un objectif de description détaillée du comportement du bâtiment, il sera alors conseillé de basculer vers une modélisation plus fine qui considère la protection solaire et ses propriétés thermiques ainsi que la lame d'air et s'assurer alors une modélisation plus complète.

5.6 Conclusion

5.6.1 Sur la méthode de calcul facteur solaire

Nous avons présenté la méthode de calcul de la réglementation thermique française des apports de chaleur dus aux sollicitations radiatives en CLO par une paroi opaque, puis comment la réglementation thermique prend en compte la possible présence d'une lame d'air extérieure ventilée. Des limites de cette modélisation ont été constatées. Le fait qu'elle ne prend pas en compte l'inertie de la paroi en est une. L'application de la réglementation thermique n'amène aussi pas de différenciation du coefficient de correction pour le calcul du facteur solaire d'une paroi opaque avec lame d'air extérieure ventilée, selon qu'elle est équipée d'un bardage aggro-rouge ou en brut-clair. Or nous avons vu dans le calcul comme dans la mesure que le comportement du système EPLM n'est pas le même selon le bardage bois utilisé.

Ensuite, nous avons présenté la modélisation ici développée de prise en compte de l'effet de protection solaire sur une paroi opaque. Celle-ci repose sur la caractérisation des protections solaires par un facteur solaire et une résistance thermique superficielle extérieure. Nous avons alors déterminé les valeurs de ces caractéristiques en utilisant le modèle PdC+.

Afin de comparer les différents modèles présentés, nous avons évalué la puissance de rafraîchissement nécessaire pour maintenir la température de la zone intérieure à une température basse de 20°C, permettant ainsi de connaître le flux de chaleur transmis correspondant à la définition du facteur solaire. Les résultats montrent que pour le cas du bardage pin aggloméré la réglementation thermique évalue relativement bien le besoin cumulé de rafraîchissement. Par contre, elle surévalue largement ce besoin dans le cas du bardage brut-clair. La modélisation que nous proposons donne, elle, de bons résultats dans les deux cas et traduit bien l'inertie de la paroi et de la protection solaire.

La bonne prise en compte de l'inertie permettrait de mieux évaluer la pertinence de solution de rafraîchissement passive qui se base sur l'inertie du bâtiment et le potentiel de rafraîchissement nocturne. Ce point serait mal valorisé par la réglementation thermique.

Il faut remarquer que le flux de chaleur transmis est faible, de l'ordre de 2 à 5 W/m². La bonne prise en compte de la diminution des apports de chaleur par une protection solaire devant un mur opaque comme un bardage, est alors peu pertinente pour un bâtiment fortement vitré. Mais dans le cas de bâtiments comme des entrepôts, l'application de cette prise en compte est pertinente, et on peut penser que l'usage de bardage peut induire des réductions de consommation d'énergie intéressante.

5.6.2 Sur le caractère intrinsèque du facteur solaire

Le facteur solaire est une caractéristique facilement appréhendable. Il permet une caractérisation très simple des performances d'une protection solaire et ainsi une comparaison évidente entre

plusieurs types de protection solaire. Il présente aussi l'intérêt d'être déjà beaucoup utilisé aussi bien dans le domaine industriel que chez les architectes.

Cependant, il s'agissait de vérifier que cette caractéristique est intrinsèque à la protection solaire. Nous avons donc étudié la possible dépendance du facteur solaire calculé à l'aide du modèle PdC+ ici présenté, à différents paramètres externes. Certains de ces paramètres externes sont relatifs à la méthode de calcul, et d'autres à la configuration de l'élément de la paroi ou même au bâtiment auquel appartient la protection solaire. L'étude des variations a montré une faible dépendance du facteur solaire à ces paramètres, ce qui valide son usage dans un cadre de travail relativement simplifié. Il faudrait cependant réaliser une étude plus approfondie sur ce point, notamment à l'échelle du bâtiment dans lequel s'inscrit la protection solaire.

5.6.3 Sur les exploitations des modèles ici présentés

Enfin, nous pouvons dire que la méthode ici présentée s'applique aussi aux protections solaires partiellement transparentes et de manière générale à toutes les protections solaires caractérisées par leur épaisseur, conductivité thermique, capacité thermique, coefficient d'absorption. Il est alors possible de réaliser un grand nombre de simulations de telle manière à établir des tables qui permettraient d'établir le facteur solaire et la résistance thermique superficielle extérieure d'une protection solaire en fonction de ces caractéristiques.

De la même façon, la modélisation ici présentée, associée au code de calcul mis en place ouvre la voie à des calculs d'optimisation de performances des protections solaires. Ce point sera d'autant plus pertinent que des configurations *In-Out* ou *Out-In* seront considérées, car la chaleur évacuée par transport convectif impacte directement le comportement thermique de la zone intérieure du bâtiment.

Conclusion générale et perspectives

Le travail ici présenté a porté sur l'impact des protections solaires sur le comportement énergétique des bâtiments.

Dans l'objectif d'étudier les transferts de chaleur à l'échelle d'une paroi opaque équipée d'une protection solaire, un banc expérimental, appelé dans l'étude EPLM, a été installé et instrumenté. L'instrumentation a été réalisée de façon à analyser l'écoulement de l'air qui prend place entre la protection solaire et le mur et son impact sur le comportement thermique du mur. Quatre solutions de protections solaires différentes (2 bardages bois, 1 store et 1 métal déployé) ont été étudiées pour 3 épaisseurs de lame d'air différentes.

L'étude des mesures met en avant le fait que le comportement général du mur est différent selon la protection solaire utilisée. Cette étude souligne aussi l'impact de l'écoulement par convection naturelle qui prend place dans la lame d'air. Le comportement de l'EPLM équipé de protections solaires à fort coefficient d'absorption et conductivité (bardage en bois aggloméré et store) se distingue du comportement avec les deux autres protections solaires à faible coefficient d'absorption (bardage brut-clair et métal déployé). Pour les premières la chaleur d'origine radiative est absorbée sur la face externe de la protection solaire puis conduite vers la lame d'air induisant ainsi un mouvement de convection naturelle ; le transport convectif ainsi créé permet une évacuation efficace de cette chaleur d'origine radiative. Pour les secondes, la chaleur conduite vers la lame d'air est nettement plus faible, limitant ainsi les mouvements de convection naturelle.

L'étude de la littérature portant sur le thème de la convection naturelle dans une cavité ouverte a montré qu'il existait un certain nombre de modèles descriptifs des phénomènes en jeu. Nous les avons classifiés en trois catégories, le premier correspond aux modèles utilisant des corrélations établies à partir de calcul CFD et en particulier les travaux de Gan (2011). Le deuxième est la modélisation du tirage thermique par Ong (2003) et enfin le dernier que nous appelons PdC, correspond à la modélisation de l'écoulement qui prend place dans la lame d'air en considérant les forces motrices et les pertes de charge en jeu.

Ces trois approches ont été intégrées dans un modèle général de transfert de chaleur dans une paroi multi-couche. Nous avons alors comparé les prédictions de ces modèles avec les mesures réalisées. De ce travail, nous retenons l'approche par perte de charge. En effet, celle-ci permet notamment de modéliser l'impact du vent extérieur sur l'écoulement qui prend place entre le mur et la protection solaire (approche PdC+). L'étude comparative entre la mesure et les résultats de simulation des gradients verticaux de température d'air dans la lame d'air, de la vitesse d'écoulement de l'air et du flux de chaleur dans le Mur, montrent que le modèle PdC+ prédit bien le comportement du mur équipé d'une protection solaire. Cependant, la nuit, la décharge du mur est sous-estimée par le modèle développé. Nous avons expliqué ce point par le fait que la convection nocturne entre l'air de la lame d'air et le mur, induite par le vent, n'était pas prise en compte. Ainsi une étude complémentaire portant sur la convection mixte, qui prend place dans ces conditions, permettrait d'établir de meilleurs coefficients de convection dans la lame d'air.

Nous remarquons aussi que des doutes persistent quant à la forme de l'écoulement dans les configurations où le flux de chaleur vers la lame d'air est faible ou négatif. Dans l'objectif d'améliorer la compréhension des phénomènes de transferts dans ces cas, le protocole expérimental pourrait

être amélioré en intégrant la mesure du sens de l'écoulement vertical dans la lame d'air, du coefficient de convection dans la lame d'air et de l'orientation du vent extérieur.

Un des objectifs de ce travail était de fournir une caractérisation des performances des protections solaires pour les concepteurs, architectes et industriels. Cette caractérisation devait alors être indépendante de l'enveloppe associée. Ainsi pour proposer une modélisation simplifiée de l'impact des protections solaires étudiées sur le comportement du mur associé, nous avons fait le choix d'introduire le facteur solaire des protections solaires. Nous avons ainsi présenté une méthode de calcul se basant sur des simulations réalisées avec le modèle PdC+ qui permet de quantifier ce facteur solaire. Le facteur solaire ainsi calculé peut alors être utilisé dans un modèle classique de paroi pour la modélisation de l'effet de la protection solaire, le facteur solaire multipliant l'apport solaire radiatif incident sur le mur étudié.

Nous avons comparé ce choix de modélisation à celui proposé par la réglementation thermique française. L'application de la réglementation thermique aboutit à un coefficient de correction de facteur solaire de la paroi opaque pour la prise en compte d'un bardage. Nous avons noté que celui-ci est le même pour les deux types de bardage étudiés alors que la mesure comme les simulations ont montré la différence de comportement et d'impact sur le mur. La méthode réglementaire fournit donc une modélisation qui traduit l'impact de la protection solaire, mais ce choix de modélisation ne peut être intégré dans une plateforme de simulation thermique dynamique, ne prend pas en compte l'inertie de la paroi et les propriétés de la protection solaire.

La modélisation proposée fournit de meilleurs résultats que la méthode réglementaire pour l'estimation du flux de chaleur apporté à la zone intérieure sous l'effet de l'apport radiatif en CLO. Elle quantifie mieux l'énergie apportée à la zone sur une certaine durée et décrit mieux l'évolution du flux correspondant.

Plusieurs suites du travail ici présenté sont envisageables, et pour certaines déjà en cours. Certaines sont relatives à l'objectif d'aider le travail de conception des protections solaires et des enveloppes solaires des bâtiments en vue de leurs valorisations. Pour les architectes et ingénieurs des outils d'aide à la conception peuvent être réalisés. Les valeurs de facteur solaire d'une grande gamme de protections solaires peuvent être répertoriées dans des tables ou abaques où varient les différentes propriétés des protections solaires comme la résistance thermique, la couleur... Se référer à ces tables ou abaques permettrait alors de connaître facilement les valeurs des facteurs solaires. Pour les industriels, le dimensionnement est d'une importance cruciale. Le modèle développé de description des transferts qui intègre aussi la zone thermique associée à l'élément de paroi étudié, permet de réaliser des travaux d'optimisation de performances du système visant par exemple à réduire l'apport de chaleur vers la zone thermique. Ces travaux peuvent permettre à l'industriel d'améliorer le dimensionnement de la protection solaire ou de manière plus générale d'améliorer la conception de la protection solaire en elle-même, sa mise en place ou le couplage entre la protection solaire et l'élément de paroi associé.

Les protections solaires considérées pouvaient être perméables, mais la modélisation du caractère perméable n'était que partielle et nous avons pu constater expérimentalement son impact notamment pour la toile textile perforée. Une piste de modélisation a été présentée dans le 4^{ème} chapitre. Il est alors possible d'intégrer plus finement cet aspect et d'ainsi étendre le domaine d'application du modèle.

Pour les solutions les plus complexes une autre approche est envisageable. Ainsi au lieu de décrire les transferts au niveau de l'interface entre la protection solaire et le bâtiment, il est possible de quantifier les apports de chaleur vers la zone thermique associée par la mesure et alors par inversion de modèle de caractériser l'impact de la protection solaire et d'ainsi revenir à son facteur solaire. Un banc d'essai permettant cette approche est en cours d'étude.

La modélisation ici présentée n'intègre pas les transferts de masse d'eau dans le système. Pourtant, la problématique du séchage de l'isolant dans une rénovation par isolation thermique sur la face extérieure d'un mur est essentielle. Il s'agirait alors d'introduire les mécanismes de transfert de l'eau aussi bien par convection dans l'air que dans les matériaux composants le système. Le couplage entre les transferts de masse et de chaleur peut alors aussi être envisagé.

Enfin ce travail s'est centré sur la configuration où la lame d'air est ouverte vers l'extérieur en partie basse et en partie haute. Le couplage avec le bâtiment associé est alors faible. Dans les configurations où la lame d'air est ouverte vers le bâtiment (en position basse et/ou en position haute), la prédiction du flux convectif est essentielle. Or nous avons vu que le modèle décrivait bien la vitesse d'écoulement et le gradient vertical de température d'air, ainsi ce flux de chaleur est bien évalué. De plus le modèle d'écoulement par quantification des pertes de charge permet d'étudier différentes configurations géométriques (pentes, coudes...). Des configurations comme un mur Trombe, des cheminées solaires ou même des systèmes actifs sont alors modélisables avec de faibles modifications du modèle ici présenté. Des travaux de caractérisation ou d'optimisation de leurs performances peuvent alors aussi s'appliquer à ces systèmes.

Bibliographie

1. Akbari, H., & Borgers, T. R. (1979). Free convective laminar flow within the Trombe wall channel. *Solar Energy*, 22(2), 165–174.
2. Alamdari F. Hammond G., (1963) Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms, *Build. Serv. Rex Technol.*, 4 106-1 12.
3. Allard F. Natural ventilation in buildings e a design handbook. London: James & James; 1998.
4. Aung, W., Fletcher, L., & Sernas, V. (1972). Developing laminar free convection between vertical flat plates with asymmetric heating. *International Journal of Heat and Mass ...*, 15, 2293–2308.
5. Bansal NK, Mathur R, Bhandari MS. Astudy of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in building. *Building Environment* 1994; 29:495e500.
6. Bansal, N., Mathur, R., & Bhandari, M. (1993). Solar chimney for enhanced stack ventilation. *Building and Environment*. Retrieved from
7. Bansal, N., Mathur, R., & Bhandari, M. (1993). Solar chimney for enhanced stack ventilation. *Building and Environment*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360132393900422>
8. Borgers, T. R., & Akbari, H. (1984). Free convective turbulent flow within the trombe wall channel. *Solar Energy*, 33(3-4), 253–264.
9. Brager, G S, and R De Dear. (2001) “Center for the Built Environment Climate , Comfort , & Natural Ventilation : A new adaptive comfort standard for.” *Ashrae Standard*
10. Burek, S. a. M., & Habeb, a. (2007). Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls. *Energy and Buildings*, 39(2), 128–135.
11. Chami, N., & Zoughaib, a. (2010). Modeling natural convection in a pitched thermosyphon system in building roofs and experimental validation using particle image velocimetry. *Energy and Buildings*, 42(8), 1267–1274
12. Churchill S.W. Chu H, (1975) Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18 1323-1329. 1141
13. CORCIONE, M. (2007). Heat transfer correlations for free convection from upward-facing horizontal rectangular surfaces. *wseas.us*, 2(3)
14. Davidovic, D., Piñon, J., Burnett, E. F. P., & Srebric, J. (2012). Analytical procedures for estimating airflow rates in ventilated, screened wall systems (VSWs). *Building and Environment*, 47, 126–137.
15. Davidovic, D., Srebric, J., & Burnett, E. F. P. (2006). Modeling convective drying of ventilated wall chambers in building enclosures. *International Journal of Thermal Sciences*, 45(2), 180–189.
16. Duffie J.A., Beckman W.A., *Solar Energy Thermal Process*, JohnWiley and Sons Inc., 1974.
17. EN 13363 « Dispositifs de protection solaire combinés à des vitrages calcul du facteur de transmission solaire et lumineuse »
18. EnergyPlus Engineering Document, inVersion 1.2.1, U.S. Department of Energy, 2005.
19. Falk, J., & Sandin, K. (2013). Ventilated rainscreen cladding: A study of the ventilation drying process. *Building and Environment*, 60, 173–184.

20. Falk, J., & Sandin, K. (2013). Ventilated rainscreen cladding: A study of the ventilation drying process. *Building and Environment*, 60, 173–184.
21. Falk, J., & Sandin, K. (2013). Ventilated rainscreen cladding: Measurements of cavity air velocities, estimation of air change rates and evaluation of driving forces. *Building and Environment*, 59, 164–176.
22. Fishenden, M. Saunders O. A., *An Introduction to Heat Transfer*, Oxford Univ. Press, London, 1950.
23. Flourentzou F, Van der Maas J, Roulet C-A. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. *Energy and Buildings* 1998;27:283–92.
24. Fossa, M., Ménézo, C., & Leonardi, E. (2008). Experimental natural convection on vertical surfaces for building integrated photovoltaic (BIPV) applications. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(4), 980–990.
25. Minke G. Witter G., *Hauser mit grünem Pelz*, I Dieter Fricke, Frankfurt/Main, 1983, p. 26.
26. Gan, G. (1998). A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings. *Energy and buildings*, 17.
27. Gan, G. (2006). Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation. *Energy and Buildings*, 38(5), 410–420.
28. Gan, G. (2011). General expressions for the calculation of air flow and heat transfer rates in tall ventilation cavities. *Building and Environment*, 46(10), 2069–2080.
29. Gratia, E., & De Herde, A. (2004). Natural cooling strategies efficiency in an office building with a double-skin façade. *Energy and Buildings*, 36(11), 1139–1152.
30. Gratia, E. (2004). Natural ventilation in a double-skin facade. *Energy and Buildings* 36, 137–146
31. Hägersted, O., & Hardeerup, L. (2011). Comparison of measured and calculated temperature and relative humidity with varied and constant air flow in the façade air gap. *9th Nordic Symposium on ...*, (Hägerstedt). Retrieved from
32. Hamdy, I., & Fikry, M. (1998). Passive solar ventilation. *Renewable Energy*, 14, 381–386. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148198000937>
33. Hellstrom, B, H Kvist, H Hakansson, and H Bulowhube. “Description of ParaSol v3.0 and comparison with measurements.” *Energy and Buildings* 39, no. 3 (March 2007): 279-283.
34. Hénon, A., Mestayer, P. G., Groleau, D., & Voogt, J. (2011). High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign. *Building and Environment*, 46(9), 1747–1764.
35. Hensen, J., Bartak, M., & Drkal, F. (2002). Modeling and simulation of a double-skin façade system. *ASHRAE Transactions*, 108. Retrieved from
36. Hirunlabh, J., Kongduang, W., Namprakai, P., & Khedari, J. (1999). Study of natural ventilation of houses by a metallic solar wall under tropical climate. *Renewable Energy*, 18(1),
37. Holm, D. (1989). Thermal improvement by means of leaf cover on external walls—A simulation model. *Energy and Buildings*, 14, 19–30. Retrieved from
38. Hoyano, A. (1988). Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building. *Energy and Buildings*, 11(1-3), 181–199.
39. Idelchik, I.E *Handbook of Hydraulic Resistance*, third ed., CRC Press Inc., 1994.
40. Ip, K., Lam, M., & Miller, A. (2010). Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Building and Environment*, 45(1), 81–88.

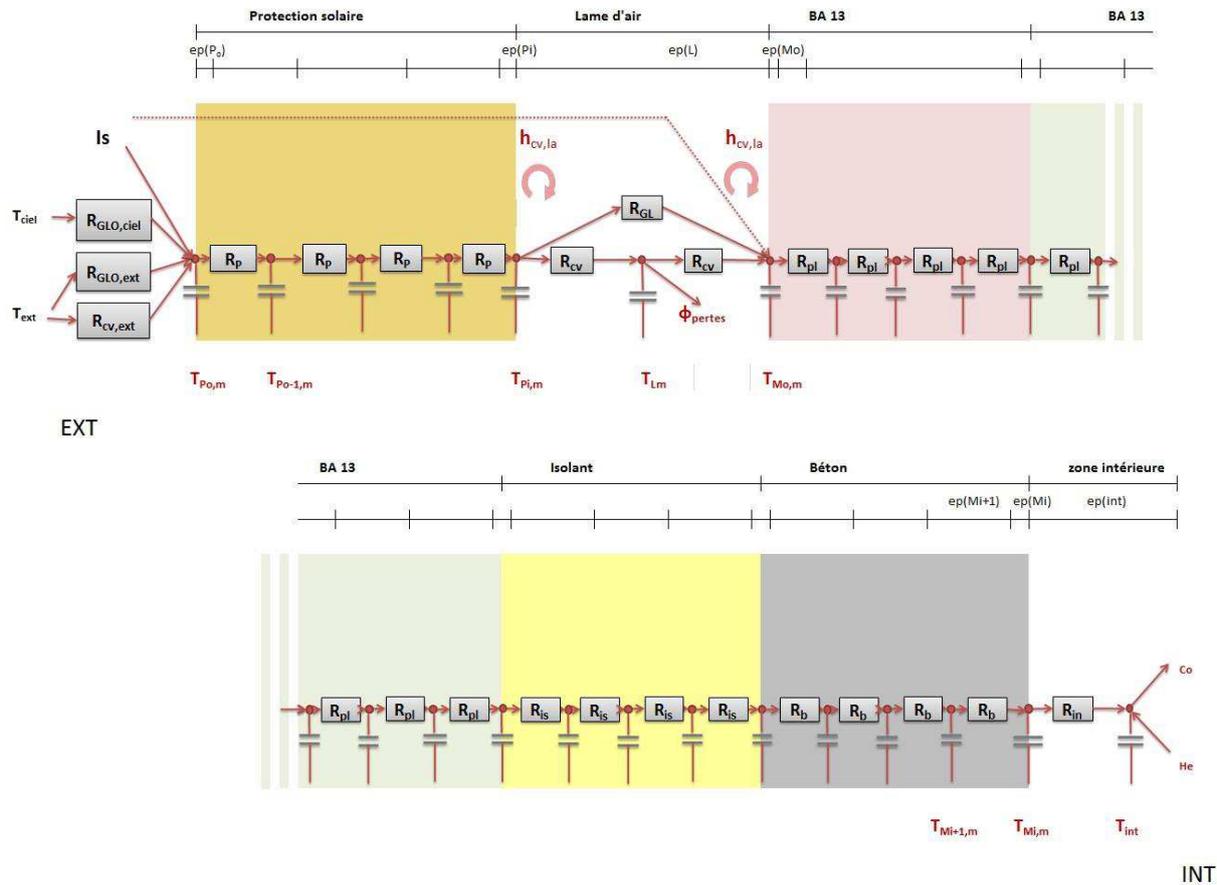
41. Jones A.M., TAS, Software package for the thermal analysis of buildings, EDSL Ltd., Milton Keynes, UK.
42. Kaiser, a., Zamora, B., & Viedma, a. (2004). Correlation for Nusselt number in natural convection in vertical convergent channels at uniform wall temperature by a numerical investigation. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 25(4), 671–682.
43. Kuhn, T. E., Herkel, S., Frontini, F., Strachan, P., & Kokogiannakis, G. (2011). Solar control: A general method for modelling of solar gains through complex facades in building simulation programs. *Energy and Buildings*, 43(1), 19–27.
44. Labat, M. (2012). Chaleur-Humidité-Air dans les maisons à ossature bois: expérimentation et modélisation. Thèse. Institut National des Sciences Appliquées, France.
45. Labat, M., Woloszyn, M., Garnier, G., Rusaouen, G., & Roux, J. J. (2012). Impact of direct solar irradiance on heat transfer behind an open-jointed ventilated cladding: Experimental and numerical investigations. *Solar Energy*, 86(9), 2549–2560.
46. Leon, M. A., & Kumar, S. (2007). Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors. *Solar Energy*, 81(1), 62–75.
47. Marinosci, C., Strachan, P. a., Semprini, G., & Morini, G. L. (2011). Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen façade building. *Energy and Buildings*, 43(4), 853–863.
48. Mayer, E., Künzle, H. 1983. Untersuchungen über die notwendige Hinterlüftung an Außenwandbekeidung aus grobformatigen Bauteilen. Frahofer Institut für Bauphysick, Forschungsbericht B Ho 1/83, March.
49. McAdams, W.H., 1994. Heat Transmission, 3rd Edition. McGraw- Hill, New York.
50. MITOGO ESENG, J. N. (2012). Quantification expérimentale des performances d'un dispositif de bardage avec lame d'air tampon et parement en bois. Thèse, Université Bordeaux 1, France.
51. Monteith J.L. , Unsworth M.H. (1991). «Principles of environmental physics». New York: Edward Arnold.
52. Norme EN ISO 9288 :1989. Isolation thermique -- Transfert de chaleur par rayonnement -- Grandeurs physiques et définition
53. Norme NF EN 13363-2 « Dispositif de protection solaire combiné à des vitrages, calcul du facteur de transmission solaire et lumineuse », distingue 4 composantes :
54. NF EN ISO 13786 : Performance thermique des composants de bâtiment - Caractéristiques thermiques dynamiques - Méthodes de calcul.
55. NF EN 673 « Verre dans la construction – Détermination du coefficient de transmission thermique, U – Méthode de calcul ».
56. Ong, K. S. (2003). A mathematical model of a solar chimney. *Renewable Energy*, 28(7), 1047–1060.
57. Ong, K. S., & Chow, C. C. (2003). Performance of a solar chimney, 74, 1–17.
58. Peuportier, B., & Sommereux, I. B. (1990). Simulation Tool With Its Expert Interface for the Thermal Design of Multizone Buildings. *International Journal of Solar Energy*, 8(2), 109–120.
59. Projet ANR PACIBA 2006.
60. Rodriguez, J. (2006). Déshydratation par effet de serre d'un produit emballé dans un film polymère perméable aux molécules d'eau : approche expérimentale et de modélisation.

61. Rodriguez J., D. Bruneau D., Guiavarch A., Gobbé C. (2007). Greenhouse-effect dehydration of a product wrapped in a semi-transparent, semi-permeable film : experimental approach and proposed approached model. *European Physical Journal – Applied Physics* 40, 95-112.
62. Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C. H., Asim, N., & Sulaiman, M. Y. (2012). Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6340–6351.
63. Sanjuan, C., Sánchez, M. N., Heras, M. D. R., & Blanco, E. (2011). Experimental analysis of natural convection in open joint ventilated façades with 2D PIV. *Building and Environment*, 46(11), 2314–2325. doi:10.1016/j.buildenv.2011.05.014
64. Sanjuan, C., Suárez, M. J., Blanco, E., & Heras, M. D. R. (2011). Development and experimental validation of a simulation model for open joint ventilated façades. *Energy and Buildings*, 43(12), 3446–3456. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.005
65. Stec, W. J., & Paassen, a. H. C. Van. (2005). Symbiosis of the double skin façade with the HVAC system. *Energy and Buildings*, 37(5), 461–469.
66. Stec, W. J., Van Paassen, a. H. C., & Maziarz, a. (2005). Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings*, 37(5), 419–427.
67. Straube, J., & Finch, G. (2009). *Ventilated Wall Claddings: Review, Field Performance, and Hygrothermal Modeling*.
68. Susorova, I., Angulo, M., & Bahrami, P. (2013). A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*, 67, 1–13.
69. Tonui, J. K., & Tripanagnostopoulos, Y. (2008). Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation. *Solar Energy*, 82(1), 1–12.
70. Torcellini P, Pless S. Trombe walls in low-energy buildings: practical experiences. Colorado: Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy by Midwest Research Institut; 2004.
71. Trocmé. M. (2009). Aide au choix de conception de bâtiments économes en énergie. Thèse, Ecole nationale supérieure des mines de Paris, France.
72. Zalewski, L., Chantant, M., Lassue, S., & Duthoit, B. (1997). Experimental thermal study of a solar wall of composite type. *Energy and Buildings*, 25(1), 7–18.
73. Zamora, B., & Kaiser, a. S. (2009). Optimum wall-to-wall spacing in solar chimney shaped channels in natural convection by numerical investigation. *Applied Thermal Engineering*, 29(4), 762–769.

Annexes

1. Schéma de modélisation des transferts de chaleur dans EPLM

Représentation schématique des transferts dans la modélisation d'EPLM. Partie gauche, en haut, et partie droite, en bas.



2. Tableaux de corrélations issues du travail de Gan (2011).

Pour le cas symétrique :

Correlation	Coefficient t	q _r (%)			
		0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 50
$Nu = c_1 \left[Ra \left(\frac{H}{b} \right)^{3/2} \right]^m$	c ₁	0.119 + 0.00354 q _r - 0.000187 q _r ²		0.137	
	m	0.273 - 0.00157 q _r + 0.0000845 q _r ²		0.265	
$Nu = c_2 (Ra^a Re)^n$	c ₂	0.198 - 0.00893 q _r	0.106 + 0.00182 q _r	0.143	
	a	0.591 - 0.0393 q _r			
	n	0.288 + 0.0152 q _r	0.418 - 0.0013 q _r	0.391	

For q_r > 50%, replace q_r with (1 - q_r).

Pour le cas non symétrique :

Constant/ Exponent	q _r (%)			
	0 - 5	5 - 60	60 - 95	95 - 100
c ₁	0.0897 + 0.00277 q _r - 0.000233 q _r ²	0.0961	0.0761 + 0.000359 q _r	-3.63 + 0.0776 q _r + 0.000402 q _r ²
m	0.29 - 0.000579 q _r	0.287 - 0.000116 q _r		1.92 - 0.0341 q _r + 0.000178 q _r ²

Constant/ Exponent	q _r (%)				
	0 - 5	5 - 20	20 - 90	90 - 95	95 - 100
c ₂	0.206 - 0.0103 q _r	0.0712 q _r ^{0.132}	0.0972 + 0.000357 q _r	0.0223 - 0.00104 q _r	0.0183 q _r - 1.61
a	0.667 - 0.0333 q _r				1/3
n	0.265 + 0.0161 q _r	0.446 - 0.00116 q _r	0.427 + 0.000275 q _r	0.331 + 0.00082 q _r	2.87 - 0.026 q _r

3. Données constructeurs des protections solaires

Documentation sur les bardages bois utilisés (pages 1,2,3,10,13,17,18,19) :

<http://www.gascognewoodproducts.com/assets/files/2012/CatalogueBardage.pdf>

Documentation sur le store utilisé (pages 1,2,3,4,7) :

http://www.baches-mediterranee.com/Documentation_Bache_soltis_92.pdf

