



Université de Bordeaux 1

THÈSE

Présentée pour obtenir le titre de

DOCTEUR

De

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

École doctorale : **Sciences Physiques pour l'Ingénieur**

Spécialité : **Mécanique**

Par

Jesús Nvé MITOGO ESENG

**QUANTIFICATION EXPERIMENTALE DES PERFORMANCES D'UN DISPOSITIF DE
BARDAGE AVEC LAME D'AIR TAMPON ET PAREMENT EN BOIS**

Soutenue le 13 mars 2012 devant le jury composé de :

MM. Daniel GUITARD, Professeur émérite, Université Bordeaux 1
Antoine COLLIGNAN, Professeur, SupAgro Montpellier
Yves JANNOT, HDR Ingénieur de Recherche CNRS, Nancy
Denis BRUNEAU, HDR Maître de Conférences, AM ParisTech,
Jean-Rodolphe PUIGGALI, Professeur, Université Bordeaux 1

Président
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse
Directeur de thèse

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ici tous ceux qui ont contribué, de manière directe ou indirecte, à la réussite de ce travail.

Merci en premier lieu à Daniel Guitard qui a bien voulu d'assurer le rôle de président du jury, à Antoine Collignan et Yves Jannot qui ont bien voulu assurer le rôle de rapporteurs, pour toute l'attention qu'ils ont porté à mon travail. Je souhaite également remercier l'ensemble des membres du jury, pour les remarques et propositions constructives qui ont été apportées lors de la soutenance.

Je remercie vivement Eric Arquis et Jean-Christophe Batsale de m'avoir accueilli dans leur laboratoire où j'ai pu travailler dans des très bonnes conditions, tant matérielles qu'humaines. Ce fut une grande chance pour moi de faire ma thèse au TREFLE, et de découvrir le rôle de cet organisme et ses activités variées.

Pour leurs conseils avisés, leur aide, et leurs propositions toujours constructives, je remercie mes directeurs de thèse, Denis Bruneau et Jean-Rodolphe Puiggali ; votre encadrement m'a non seulement permis de mener à bien ce travail, mais aussi d'apprendre énormément, tant sur le plan du contenu scientifique que de la méthodologie et de la rigueur nécessaire au travail scientifique.

Mes très grands remerciements à Carlos Nse Nsuga et Pedro Ndong Asumu, Recteur et Vice-recteur de l'Université Nationale de Guinée Equatoriale respectivement, leur appui tout au long de cette thèse a été plus que nécessaire.

Cette thèse a été rendue possible par le financement de l'ambassade de France à Malabo, je tiens à remercier cet organisme et plus particulièrement à Daniel Drevet, Pierre Schraen et Marie Experton.

Un très grand merci à Henri Bertin, Elena Palomo, Waste Aregba, Azita Hammadi-Senichault, Philippe Lagière, Jérôme Lopez, Maxime Raynaud, Alain Sempey, Shakir Ameroudine, Lilian Clerjaud, Claire Gobbé, Wahbi Jomaa, Canseco Vladimir, Manuel Heredia et Jean Luc D'auvergne, leur assistance a été d'un grand apport pour ce travail.

De grands remerciements à Alain Sommier et Alain Ochsenhofer sans qui l'étude expérimentale n'aurait pas été d'aussi bonne qualité ; ce travail vous doit beaucoup, merci d'avoir partagé votre savoir-faire avec moi. J'ai beaucoup aimé travailler à vos côtés. Enfin, on ne peut faire de thèse au TREFLE sans la présence, l'aide et le travail discrets de Muriel, Marian, Frédéric et Sylvianne ; ma gratitude éternelle.

Je ne saurais dire à quel point le temps passé au TREFLE a été riche et beau humainement parlant, un très grand merci aux post-docs et doctorants Mario, Essam, Vigen, Andrea, Carolina, Wafa, Olf, Malick, Serge, Marie, Fouzia, Cecile, Thomas, Claudia, Alexandre, Clarence et Nistrine.

NOMENCLATURE.....	1
RESUME	3
INTRODUCTION	4
1.1 Le confort thermique dans l’habitat existant.....	6
1.2 La réponse bioclimatique au confort.....	7
1.3 Vision générique de la solution d’isolation par l’extérieur.....	8
1.4 La solution technique pour l’isolation extérieure choisie	10
1.5 Le fonctionnement du système de bardage	14
1.6 Positionnement du travail développé dans ce mémoire	16
2.1 Cahier des charges du dispositif expérimental et approche expérimentale	18
2.2 Description des dispositifs expérimentaux et de leur instrumentation	19
2.2.1 Dispositif de Levignacq	19
2.2.2 Dispositif du site ENSAM – Talence.....	21
2.3 Caractérisation des matériaux	23
2.4 Eléments clefs dans l’obtention des données.....	24
2.6 Conditions climatiques des séquences	27
2.6.1 Séquence estivale de Levignacq (séquence A)	28
2.6.2 Séquence estivale du site ENSAM (Séquence B).....	29
2.6.3 Séquence hivernale du site ENSAM (Séquence C)	32
2.7 Energie globale reçue par le dispositif de bardage	35
2.8 Démarche expérimentale globale.....	37
Chapitre 3 : RESULTATS, ANALYSE DU COMPORTEMENT THERMIQUE	38
3.1 Paramètres à mesurer pour comprendre les phénomènes physiques	38
3.2 Evolution de l’éclairement et des températures	39
3.3 Présentation d’un résultat type de journée ensoleillée.....	41
3.3.1 Analyse des écoulements entre plaques du dispositif de bardage.....	42
3.3.2 Analyse des températures de l’air le long du canal.....	43
3.3.3 Analyse des températures du dispositif de bardage en hauteur médiane.....	44
3.4 Présentation d’un résultat type de journée nuageuse	45
3.4.1 Analyse des écoulements dans la lame d’air en hauteur médiane	45
3.4.2 Analyse des températures de l’air le long du canal entre plaques	46
3.4.3 Analyse des températures du dispositif de bardage en hauteur médiane.....	47
3.5 Etude comparative des écoulements entre plaques	47
3.5.1 Transferts thermiques dans les lames d’air de différentes épaisseurs.....	47
3.5.2 Influence de la plaque de parement sur la vitesse et les transferts.....	49

3.5.3 Comparaison des essais entre les deux sites géographiques	51
3.6 lame d'air circulante et non circulante.....	53
3.6.1 lame d'air épaisse	53
3.6.2 lame d'air mince	62
3.7 Différence de comportements liés aux murs supports	72
3.8 La relation entre la vitesse et température de l'air entre plaques.....	73
3.9 Influence du rapport d'aspect.....	75
4.1 La modélisation globale du dispositif de bardage.....	77
4.2 Compléments d'analyse	79
4.2.1 Flux thermiques entre plaques	79
4.2.1.1 lame d'air ventilée	80
4.2.1.2 lame d'air non ventilée	81
4.2.2 Caractéristiques générales de l'écoulement et des transferts thermiques	83
4.2.2.1 lame d'air ventilée	83
4.2.2.2 lame d'air non ventilée	84
4.2.3 Les vitesses de l'air entre plaques.....	85
4.2.4 Rendement des dispositifs de bardage	90
4.3. Quelques simulations	92
4.3.1 Plaque de parement en pin maritime et lame d'air mince.....	92
4.3.2 Plaque de parement en pin maritime et lame d'air épaisse	93
4.3.3 Températures et vitesses de l'air en hauteur médiane, parement en pin maritime.	95
4.3.4 Plaque de parement en aggloméré et lame d'air mince	95
4.3.5 Plaque de parement en aggloméré et lame d'air épaisse.....	97
4.3.6 Températures et vitesses de l'air en hauteur médiane, parement en aggloméré	98
4.4. Résultats et discussions.....	99
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	101
ANNEXES.....	108
Annexe A : Caractéristiques techniques des instruments de mesure	108
Annexe B : Quelques données complémentaires	110
Annexe C : Evolution de l'éclairement et températures	111

NOMENCLATURE

Lettres latines

a	Diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$)
A_0	Section de la sortie de la lame d'air (m^2)
A_r	Rapport entre les sections d'entrée et de sortie de la lame d'air
C_d	Coefficient de décharge de l'air du canal
C_p	Capacité thermique massique ($J.Kg^{-1}.°C^{-1}$)
e	Epaisseur de la lame d'air entre le mur et le bardage (m)
e_p	Epaisseur du panneau de particules (m)
e_{iso}	Epaisseur de l'isolant (m)
e_{pl}	Epaisseur du plâtre (m)
E	Eclairement ($W.m^{-2}$)
F	Epaisseur du mur support (m)
g	Accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$)
Gr	Nombre de Grashof
H	Hauteur du dispositif de bardage (m)
h_{be}	Coefficient de transfert convectif sur la surface extérieure de la plaque de parement ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)
h_{bi}	Coefficient de transfert convectif sur la surface interne de la plaque de parement ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)
h_{ciel}	Coefficient d'échange convectif du ciel ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)
h_{cv}	Coefficient global de transfert entre le mur et le bardage ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)
h_{la}	Coefficient de transfert convectif dans la lame d'air non ventilée ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)
h_{me}	Coefficient de transfert convectif sur la surface externe du mur isolant ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)
h_{re}	Coefficient d'échange radiatif à l'extérieur du dispositif de bardage ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)
h_{ri}	Coefficient d'échange radiatif dans la lame d'air ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)
$h_{r,ciel}$	Coefficient d'échange radiatif du ciel ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)
h_{vent}	Coefficient d'échange convectif en fonction de la vitesse du vent ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)
h_{zone}	Coefficient global de transfert de l'ambiance intérieure (habitable) ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)
m	Masse de l'air (kg)
$\dot{m}$	Débit massique ($kg.s^{-1}$)
Nu	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandtl
Ra	Nombre de Rayleigh
S	Surface des plaques délimitant la lame d'air (m^2)
t	Temps (s ou mn)
T	Température ($°C$ ou K)
$\bar{T}$	Température moyenne ($°C$ ou K)
v	Vitesse d'écoulement de l'air ($m.s^{-1}$)
W	Epaisseur de la plaque de parement (m)

Lettres Grecques

α	Coefficient d'absorption
β	Coefficient d'expansion (K^{-1})
γ	Pondération ou constante d'approximation
ε	Emissivité des surfaces (mur support et plaque de parement)
λ	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

μ	Coefficient de viscosité dynamique ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
ν	Coefficient de viscosité cinématique ($m^2.s^{-1}$)
ρ	Masse volumique ($kg.m^{-3}$)
σ	Constante Stephan-Boltzmann ($W.m^{-2}.K^{-4}$)
Φ	Flux thermique (W)
Δ	Variation d'une grandeur physique

Indices et exposants

a,la	L'air de la lame d'air
ac,lae	L'air de la lame d'air épaisse et plaque de parement en pin maritime
ac,lam	L'air de la lame d'air mince et plaque de parement en pin maritime
af,lae	L'air de la lame d'air épaisse et plaque de parement en aggloméré du pin
af,lam	L'air de la lame d'air mince et plaque de parement en aggloméré du pin
amb	Environnement extérieur
b	Mur isolant sur béton
be	Surface extérieure de la plaque de parement
bi	Surface intérieure de la plaque de parement
b,la	Entrée de la lame d'air
bc,la	Entrée de la lame d'air et plaque de parement en pin maritime
c	Plaque de parement en pin maritime
f	Plaque de parement en aggloméré
h,la	Sortie de la lame d'air
hc,la	Sortie de la lame d'air et plaque de parement en pin maritime
hf,la	Sortie de la lame d'air et plaque de parement en aggloméré du pin
mc,la	Hauteur médiane de la lame d'air et plaque de parement en pin maritime
mf,la	Hauteur médiane de la lame d'air et plaque de parement en aggloméré du pin
m,be	Hauteur médiane de la surface extérieure de la plaque de parement
m,bi	Hauteur médiane de la surface intérieure de la plaque de parement
m,la	Hauteur médiane de la lame d'air
mc,lam	Hauteur médiane de la lame d'air mince et plaque de parement en pin maritime
mc,lae	Hauteur médiane de la lame d'air épaisse et plaque de parement en pin maritime
mf,lam	Hauteur médiane de la lame d'air mince et plaque de parement en aggloméré du pin
mf,lae	Hauteur médiane de la lame d'air épaisse et plaque de parement en aggloméré du pin
m,me	Hauteur médiane de la lame d'air sur la surface extérieure du mur isolant
mc,ise	Hauteur médiane du mur isolant, plaque de parement en pin maritime et surface extérieure de l'isolant
mc,isi	Hauteur médiane du mur isolant, plaque de parement en pin maritime et surface intérieure de l'isolant
mc,isomil	Hauteur médiane du mur isolant, plaque de parement en pin maritime et au milieu de l'isolant
mc,ba2	Hauteur médiane du mur isolant, plaque de parement en pin maritime et entre plaques de plâtre
mf,ise	Hauteur médiane du mur isolant, plaque de parement en aggloméré du pin et surface extérieure de l'isolant
mf,isi	Hauteur médiane du mur isolant, plaque de parement en aggloméré du pin et surface intérieure de l'isolant
mf,ba2	Hauteur médiane du mur isolant, plaque de parement en aggloméré du pin et entre plaques de plâtre
mf,me	Hauteur médiane de la lame d'air sur la surface extérieure du mur isolant et plaque de parement en aggloméré du pin
ob	Mur support à ossature bois
Tass	Tasseaux
env	Environnement
r,ref	Hauteur de référence de température pour le premier calcul de vitesses
r,f	Hauteur de référence de température pour le deuxième calcul de vitesses

RESUME

Le secteur du bâtiment en phase d'exploitation est le secteur le plus énergivore conduisant aujourd'hui à de nombreuses études sur la thermique du bâtiment pour réduire la consommation d'énergie tout en préservant le confort des usagers. Le travail présenté ici met en avant les performances d'une technique d'isolation d'un bâtiment, par un dispositif de bardage soumis à un rayonnement solaire incident. Entre le bardage, en pin maritime, et le mur (bois ou béton), une lame d'air est susceptible de circuler, généralement du bas vers le haut en emportant une certaine quantité de chaleur, il s'agit ainsi d'un dispositif à rapprocher d'un mur TROMBE ou d'une façade bioclimatique. Un mur en bois ou en béton, une épaisseur différente de la lame d'air, un changement d'épaisseur et de qualité de plaque de parement constituent autant de variations des paramètres dont les conséquences sur le confort sont étudiées dans ce travail.

L'objectif principal de cette étude a été de réaliser une caractérisation complète du dispositif pariétal de l'enveloppe du bâtiment par approche expérimentale, pour obtenir une meilleure connaissance des phénomènes physiques qui se développent dans ce type de système.

Un modèle thermique de paroi avec deux configurations de lame d'air (circulante ou non) a été réalisé. L'étude expérimentale conséquente mise en œuvre a permis de caractériser les échanges thermiques à l'intérieur des lames d'air verticales, qui sont la clef de ce type de dispositif, en fonction de différents paramètres. Les résultats des performances thermiques ont été retenus par une étude numérique dans la configuration des échanges thermiques.

L'étude expérimentale en période estivale a permis d'établir que l'effet thermosiphon est fonction de plusieurs paramètres dont le flux incident, l'écart de températures entre l'intérieur de la plaque de parement et l'extérieur du mur isolant, la température ambiante et la géométrie globale du dispositif. Le débit d'air et les températures d'entrée et de sortie permettent de chiffrer l'extraction de cet écoulement.

L'étude expérimentale en période hivernale a permis de déterminer les performances thermiques de la lame d'air non ventilée et son impact sur le flux thermique traversant le mur dans le sens horizontal vers l'habitable. En situation de lame d'air ouverte, l'écart entre la température de l'air ambiant et la température de l'air dans le canal ventilé génère des mouvements d'air ascendants liés à la convection naturelle et assurant un débit dans la cheminée ainsi créée.

Cette étude a notamment permis de mettre en évidence l'influence du rapport d'aspect de différentes configurations du dispositif de bardage sur les profils de température le long de la lame d'air, en conditions climatiques naturelles.

INTRODUCTION

Dans cette étude, nous souhaitons caractériser le comportement thermique d'un système mural d'isolation extérieure plus connu sous la dénomination de dispositif de bardage. Ceci passe par l'évaluation de l'influence du système sur les transferts thermiques, ceci en fonction de l'ensoleillement naturel incident et suivant un certain nombre de paramètres constructifs tels que, notamment, l'épaisseur de la lame d'air et le type de bardage.

La problématique posée dans ce travail est le confort dans l'habitat existant, nous souhaitons créer un climat intérieur agréable et bien adapté à nos besoins. Dans les pays de climat tempéré souvent industrialisés, la nécessité de réduire la consommation énergétique et de diminuer les gaz à effet de serre dans le secteur du bâtiment motive régulièrement le renforcement des exigences au niveau de la performance énergétique des bâtiments. Ceci se traduit par une modification de la réglementation thermique et en particulier par une volonté de réduction des coefficients de transmission thermique pour les différents composants de l'enveloppe du bâtiment.

Dans les régions chaudes (équatoriales, tropicales et désertiques) de nos jours, la climatisation des bâtiments est un besoin essentiel et pour accomplir cette tâche, les climatiseurs sont utilisés. Cet équipement est utilisé pour refroidir l'espace d'habitation dans l'édifice dont l'échauffement est dû à l'effet combiné de l'air chaud de l'extérieur et de la chaleur produite par les habitants et les appareils ménagers à l'intérieur du bâtiment, créant ainsi un environnement confortable. Dès que cet équipement fonctionne continuellement, la consommation d'énergie et le coût induit par cet équipement peuvent être très élevés. De plus, les climatiseurs peuvent ne pas être très efficaces si jamais il y a une mauvaise conception architecturale, des périodes d'inconfort pouvant subsister. Cependant les systèmes passifs de climatisation sont employés depuis très longtemps. Ils ont influencé l'architecture par des protections solaires, les petites fenêtres, les peintures blanches, le lait de chaux, etc. Selon les climats, ces systèmes font intervenir l'humidification, la ventilation, l'inertie ou encore le rayonnement nocturne Bencheikh [2007].

Les recherches au niveau de la thermique du bâtiment, montrent que l'isolation thermique de l'enveloppe joue un rôle important dans la maîtrise de la consommation d'énergie. En effet, une grande part des échanges thermiques est liée aux flux de chaleur à travers les murs, la toiture et le plancher. Donc, en isolant une maison, en hiver on réduit les fuites de chaleur et, en été, on réduit les gains de chaleur pour maintenir l'ambiance intérieure à une température proche de celle considérée comme confortable par les occupants. Par conséquent, l'utilisation d'un système d'isolation thermique dans l'enveloppe d'un bâtiment sous tous les cieux est une réponse à l'amélioration du confort thermique.

Dans le premier chapitre, nous présentons une mise en situation et diverses réflexions quant à l'isolation extérieure de l'enveloppe du bâtiment. Considérant que les matériaux qui composent le système mural ne doivent pas avoir un prix exorbitant et pour diminuer ce coût, le bardage bois est le matériau approprié à utiliser comme composante du système. Pour mieux analyser par l'expérimentation le comportement du bardage thermique, nous avons choisi comme bardage de parement, deux matériaux différents, à savoir un aggloméré de pin et du pin maritime, dont les propriétés thermophysiques sont assez différentes.

Le second chapitre est consacré à la présentation des campagnes de mesures, l'instrumentation (capteurs utilisés et leurs placements), les configurations, la caractérisation des matériaux pour permettre : une étude du comportement en conditions réelles (exposition en extérieur), une l'analyse des données, en s'appuyant sur le modèle numérique qui a permis de fixer le cadre théorique et de schématiser le système étudié, et de justifier les choix de la campagne.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats obtenus pendant les campagnes de mesures et l'analyse du comportement thermique des dispositifs de bardage en fonction des conditions climatiques.

Au quatrième chapitre, les résultats expérimentaux sont quantifiés et la simulation permet de retrouver les essais expérimentaux. Nous présentons les résultats de la comparaison entre les mesures et les simulations numériques, et discutons de la validité du modèle et des limites imposées par l'expérimentation. L'étude de la validité du modèle est faite sur toutes les journées représentatives et configurations constructives du dispositif de bardage. Notre objectif est de montrer le comportement global des systèmes de bardage en détaillant les caractéristiques des transferts thermiques des parois.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale dans laquelle sont relevées les particularités des résultats obtenus. En outre, les perspectives pouvant s'ouvrir par le biais de ce travail sont également développées.

Il convient ici de préciser la vision plus locale ayant conduit à poser le questionnement mis en avant dans ce travail. Le fil directeur de cette thèse a pour origine la problématique du confort thermique en Guinée Equatoriale qui comme son nom l'indique, est un pays situé sur la côte atlantique de l'Afrique Equatoriale. Donc, c'est un pays au climat chaud et humide dont la diversification des énergies est un objectif à atteindre pour ne plus dépendre uniquement des énergies fossiles et l'utilisation de l'énergie solaire, telle que présentée ici, dans le domaine de l'habitat est une des réponses à ce souhait de mix énergétique. Actuellement, la climatisation des bâtiments par l'énergie électrique (climatiseurs et ventilateurs) est le moyen le plus utilisé pour résoudre le problème du confort thermique. L'utilisation, de plus en plus fréquente, du parpaing de béton creux comme matériau de construction, augmente la nécessité de la maîtrise des techniques du confort puisque le parpaing de béton creux piège de la chaleur, et la maison est condamnée à surchauffer si certaines conditions architecturales ne sont pas respectées, à savoir : la hauteur du mur, la forme et disposition des ouvertures, l'orientation des maisons, l'isolation des murs et toits, etc. Donc, la maîtrise de la climatisation passive devient un élément important dans la création d'une nouvelle approche pour résoudre le problème du confort thermique. En ville ou en campagne, les briques de terre (adobe) sont utilisées mais à moindre échelle par rapport au bois qui reste le matériau le plus utilisé vu l'environnement du pays. Par conséquent, la maîtrise du bois comme matériau de construction dans les enveloppes des maisons pour que celles-ci soient des vraies interfaces entre l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur a induit le sujet de cette thèse sur le bardage thermique bois. En effet, ce travail de recherche sur l'étude de deux bardages thermiques en vu de leur utilisation sur des maisons en bois ou béton (masse thermique faible ou importante) constitue la base d'une étude plus large ; les étapes suivantes permettront d'analyser d'autres aspects non pris en compte dans cette étude (parois horizontales, toitures, etc.). Ces travaux permettront d'obtenir une bonne connaissance des transferts thermiques dans les maisons en climat équatorial et des risques associés, et d'envisager des solutions techniques pour y remédier.

Chapitre 1 : MISE EN SITUATION

1.1 Le confort thermique dans l'habitat existant

Une fonction essentielle de nos habitats est de créer un climat intérieur bien adapté à nos besoins et à notre confort. Ceci se justifie pleinement puisque dans certains pays les habitants passent jusqu'à 95% de leur temps à l'intérieur, et de plus en climat artificiel nécessitant donc de l'énergie pour exister.

L'habitant place souvent son confort avant les économies d'énergie. Dans le but d'utiliser au mieux l'énergie à disposition dans les bâtiments, il convient donc de réaliser la construction et les installations de façon à consommer le moins possible d'énergie non renouvelable tout en assurant un confort convenable et c'est le problème auquel nous souhaitons apporter des éléments de réponse.

La notion de confort hygrothermique est à la base du dimensionnement de l'isolation thermique et du calcul des charges thermiques. Elle constitue une application directe des transferts de chaleur. Nous allons analyser différentes possibilités, et comparer leurs réponses au regard d'un objectif d'ambiance. En effet, l'objectif d'ambiance consiste à définir une zone dans laquelle les conditions de température et d'humidité sont considérées comme acceptables par la majorité des occupants. La notion de confort reste très subjective puisqu'elle dépend en particulier des conditions climatiques extérieures : dans le secteur résidentiel par exemple, il est bien connu qu'une ambiance à 18/19°C sera ressentie comme confortable en hiver, mais peut apparaître fraîche et même froide si la température extérieure est supérieure à 35°C. Ainsi, contrairement à ce qui est trop souvent imaginé, il est erroné de vouloir satisfaire ces critères de confort par une simple régulation de la température de l'air intérieur de l'habitation. Les divers paramètres ayant de l'importance pour le confort thermique interagissant entre eux, la connaissance de leurs interrelations, de leurs effets sur la satisfaction des attentes des occupants ainsi que leur mesure est nécessaire pour construire et exploiter des habitations plus respectueuses en matière de confort et de consommation d'énergie.

Les paramètres les plus importants qui participent au bilan thermique de l'homme et caractérisent l'état de confort thermique, Deval [1984], sont :

- Le niveau d'activité du sujet (correspondant à une production interne de chaleur dans le corps),
- La résistance thermique des vêtements,
- La température de l'air,
- La vitesse relative de l'air,
- La température moyenne radiante,
- Le degré hygrothermique.

La modélisation du confort thermique doit permettre d'évaluer les différents liens qui existent entre les paramètres climatiques et elle s'effectue par deux approches, à savoir :

- L'approche physiologique et psychosensorielle qui permet d'équilibrer le bilan thermique et de mettre en œuvre des mécanismes de régulation.
- L'approche événementielle qui permet d'étudier les phénomènes thermiques remarquables et l'émergence des transitions sensibles dans une dynamique de l'usager.

Globalement, on peut écrire le bilan énergétique entre l'homme et son environnement de la manière suivante, en comptabilisant les contributions de la production interne de chaleur, des échanges rayonnants, convectifs, conductifs, évaporatoires et respiratoires.

L'homme est un être homéotherme et dispose d'une stratégie métabolique efficace lui permettant de déclencher tout un processus de régulation qui facilite son adaptation au milieu.

Pour que l'homme soit dans un état de confort thermique, il faut que le débit de stockage dans l'organisme soit nul : autrement dit, qu'il puisse évacuer l'énergie produite par son activité métabolique, Fanger [1967].

Il est impossible de réunir les conditions de confort parfaites, qui satisfont tout individu. A partir de travaux de Fanger, on sait toutefois qu'il est possible de satisfaire plus de 80% d'une population en réunissant les conditions suivantes :

- La température résultante optimale en fonction de l'habillement et de l'activité. Par exemple, une personne debout en complet de ville préférera en moyenne une température de 21°C, avec une tolérance de $\pm 2,5^\circ\text{C}$,
- La vitesse relative de l'air doit être inférieure à 0,1 m/s,
- L'humidité relative peut être comprise entre 30 et 80%,
- L'asymétrie en température ne doit pas être trop importante,
- La température du sol comprise entre 19 et 28°C.

1.2 La réponse bioclimatique au confort

La réponse à trouver est celle qui nous permet de caractériser les transferts thermiques entre l'extérieur et l'intérieur de l'habitable puisque le climat varie au fil du temps et des régions, il donnera donc des paramètres différents en fonction des sites. Par exemple, même en se trouvant dans l'hémisphère nord, dans la zone tempérée, les conditions climatiques sont différentes entre les climats du centre de France et celui véritablement continental dans les steppes de Russie. Les variations climatiques sont toutefois amoindries par la relative proximité de la mer, et ne sont pas aussi marquées que dans un climat véritablement continental. Lorsque l'on est situé dans l'hémisphère nord, le soleil tourne de l'est vers l'ouest en passant par le sud, et son altitude ainsi que sa course dans le ciel varient du sud-est à sud-ouest en hiver, au nord-est à nord-ouest en été avec un écart entre les deux solstices d'environ 40°. Les vents dominants sont ouest et humides, ou nord-est et sec. La température hivernale descend fréquemment en dessous de zéro. Ces paramètres étant différents pour toutes les régions ou latitudes, il est évident que la manière de construire pour les intégrer dans une dimension bioclimatique le sera aussi. Il ne peut donc pas y avoir de solution idéale universelle.

Par définition, une construction bioclimatique est adaptée au climat du terrain sur lequel elle se trouve dans une approche très locale des problématiques. En hémisphère nord, le climat nous indique que nous allons avoir besoin de trouver de la chaleur en hiver car il fait trop froid pour que le confort soit obtenu sans rien faire, et qu'il faudra probablement rafraîchir en été car la chaleur tend à devenir excessive. Les régions chaudes humides ou arides ont des climats bien différents. Pour le climat chaud et humide, l'amplitude thermique est relativement faible : de l'ordre de 5°C d'écart entre jour et nuit tandis que, les régions à climat chaud et aride sont caractérisées par un écart de température très important entre le jour et la nuit (10 à 15°C environ). Les habitants de ces régions ont besoin de maisons aptes à maintenir la fraîcheur de la nuit pendant la journée.

L'architecture contemporaine a banalisé les formes, standardisé un style international de bâtiments conçus comme des enveloppes thermos, mécaniquement climatisées, Bouvier, [1981]. Les solutions bioclimatiques à appliquer à l'architecture doivent émaner d'une connaissance profonde des transferts thermiques dans l'enveloppe, des matériaux à utiliser, des divers types et configurations de l'isolation thermique et ainsi adapter à chaque situation une construction spécifique.

1.3 Vision générique de la solution d'isolation par l'extérieur

Pour étudier les transferts thermiques dans l'enveloppe, nous avons choisi, l'isolation par l'extérieur qui est une isolation qui au départ était présente en Europe du Nord, mais qui est de plus en plus utilisée en Europe Méridionale (régions océaniques et méridionales à basse altitude) où l'hiver est beaucoup plus doux et par conséquent, elle peut être utilisée dans les pays chauds et humides, il suffit de savoir adapter cette technique dans chaque contexte climatique Klarsfeld et Langlais [2004] . Lorsqu'elle est réalisable, elle cumule les avantages suivants :

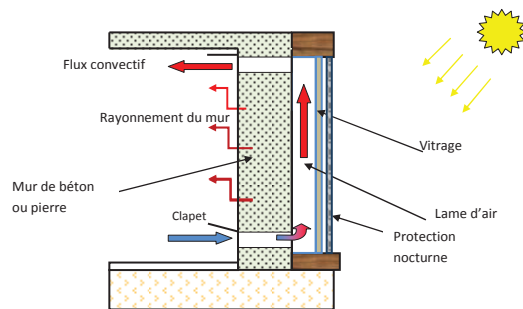
- d'une part, l'isolation extérieure assure une haute performance de l'isolation grâce à la suppression des ponts thermiques de structure. Cette technique s'adapte parfaitement à la réalisation de maisons basse consommation ou de maisons passives ;
- d'autre part, elle permet de conserver l'espace intérieur de son habitation lors d'une rénovation. Ce qui n'est pas négligeable quand on manque de place ou que l'on ne veut pas réduire sa surface habitable ;
- elle permet d'augmenter l'inertie thermique du bâtiment d'où une meilleure récupération des apports solaires et une amélioration du confort d'été et d'hiver ;
- elle augmente la durabilité des façades en les protégeant des variations de températures et des effets de l'eau (pluie, gel, condensation, etc.).

Les recherches sur les applications de la thermique solaire dans l'habitat ont été menées sur divers dispositifs parmi lesquels, figure en bonne place le mur TROMBE qui est une réponse assez pertinente à la problématique de l'isolation thermique par l'extérieur. Le mur TROMBE ou mur TROMBE-MICHEL, qui a été conçu par le professeur Félix TROMBE et l'architecte Jacques MICHEL, est un mur capteur qui permet de collecter et de stocker l'énergie solaire et donc de contribuer au confort thermique dans l'édifice.

Les travaux successifs sur ce mur permettent actuellement de le diviser en deux types : le mur TROMBE – MICHEL classique et le mur TROMBE – MICHEL composite.

Nous décrivons ci-après ces deux murs :

Principe de fonctionnement du mur TROMBE – MICHEL classique



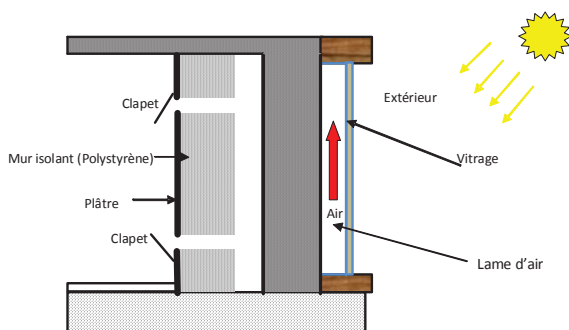
Il est composé, Figure 1.1, d'un bloc massif de matière à forte inertie (béton, pierre, etc.) installé à courte distance de la vitre. Dans le cas du phénomène de thermo-circulation, le mur massif absorbe le flux solaire à travers la vitre pour créer un effet de serre et ainsi, chauffer l'air dans le canal entre la vitre et le mur, Shen *et al.* [2007]. Le mur transfère une partie du flux à l'intérieur du bâtiment par conduction.

Figure 1.1 : Mur Trombe classique

L'échauffement de l'air dans le contact avec ce mur induit une circulation naturelle : l'air est admis par l'orifice inférieur du mur et retourne vers l'intérieur du bâtiment par l'orifice supérieur. La circulation de l'air transmet une partie du flux solaire chaud. Un phénomène inverse de thermosiphon est observé pendant les journées couvertes, la nuit et en hiver. En effet, quand le mur devient plus froid que la température à l'intérieur de l'habitation, la circulation de l'air se produit d'elle-même à partir de l'orifice supérieur vers l'orifice inférieur et l'habitation se refroidit. Pour résoudre ce problème, nous pouvons, par exemple, améliorer ce mur capteur, en augmentant l'absorption du mur stockeur en le peignant en noir tout simplement.

À partir du concept de base du mur TROMBE, on peut utiliser des technologies de pointe comme des doubles vitrages à faible émissivité thermique pour augmenter le rendement du mur. On peut rendre active cette technologie passive par l'ajout de ventilation motorisé sur les clapets de circulation d'air donc, les orifices peuvent être ouverts ou dans le cas contraire fermés. On voit aussi des développements autour de ce qui est dénommé « façade bioclimatique » permettant de tirer parti tant de l'ensoleillement que de la lumière et ainsi créer des architectures très solarisées.

Principe de fonctionnement du mur TROMBE – MICHEL composite



Le fonctionnement de la variante composite du mur est similaire à celui du mur classique, Shen *et al.* [2007]. Mais pour éviter les déperditions de chaleur pendant la période froide due à la petite résistance thermique du mur massif, nous pouvons utiliser le mur composite. Celui-ci a un mur isolant derrière le mur massif (Figure 1.2). L'énergie thermique peut être transférée à partir du canal entre la vitre et le mur massif vers l'intérieur par conduction.

Figure 1.2 : Mur Trombe composite

Cette énergie peut ensuite être transmise par convection en utilisant la thermo-circulation de l'air entre la paroi de forte inertie et le mur isolant. Pendant la nuit ou les journées

couvertes, les orifices du mur isolant sont fermés. Grâce à la grande résistance thermique, seulement une petite partie du flux thermique part de l'intérieur vers l'extérieur.

Ces systèmes passifs solaires jouent un rôle croissant dans la réduction de la climatisation mécanique, chauffage et charges de ventilation dans les édifices modernes. Les façades solaires telles que les bardages, le mur TROMBE – MICHEL et les cheminées solaires dépendent de la convection naturelle pour induire les flux d'air requis, Ryan et Burek [2010]. Alors que la convection naturelle est largement étudiée ses applications spécifiques, spécialement les systèmes de grande échelle telles que les façades solaires, ne sont pas complètement comprises, et ainsi leurs performances exactes sont rarement prédites avec précision.

Plusieurs chercheurs ont mené des études numériques sur le mur TROMBE et ont développé des modèles qui reconnaissent la nature particulière des murs TROMBE avec un canal de chauffage asymétrique et des déperditions thermiques qui avaient lieu à travers la vitre, Burek *et al.* [2006]. Ong [2003] a développé un modèle thermique simplifié basé sur les propriétés de l'épaisseur du canal et sur le flux thermique. D'autres réseaux thermiques et modèles simplifiés ont été développés pour prédire les performances diurnes de la cheminée solaire ou du mur TROMBE en particulier, Balocco [2001]. Pour sa part Gan [1998] a étudié le mouvement d'air dans une pièce ventilée naturellement par l'utilisation d'une cheminée solaire ou mur TROMBE pour le refroidissement des bâtiments en été.

Bouchair [1994] a montré qu'il existe une longueur optimale de cheminée / largeur écart de débit d'air maximum. Si la cheminée est trop grande, il se produit une circulation d'air inverse donc, un débit descendant de l'air par l'intermédiaire du centre du conduit. Bansal *et al.* [2005] a développé le modèle mathématique pour prédire la vitesse de l'air dans une cheminée solaire à partir de la prédiction des températures de l'absorbeur, de l'air dans le canal d'écoulement et de la plaque de verre. La validation expérimentale du modèle a été faite en utilisant une cheminée solaire ayant un absorbeur de 1m de hauteur. Les travaux réalisés avec trois combinaisons différentes de lame d'air et de dimensions de l'entrée de l'air dans la cheminée ont montré un bon accord entre résultats observés et ceux calculés. La petite taille de la cheminée solaire analysée a ouvert des possibilités d'utiliser les fenêtres comme cheminées solaires, à partir de vitesses d'écoulement de plus de 0,24 m/s.

Ces modèles seront repris au chapitre 4 pour illustrer nos résultats expérimentaux.

1.4 La solution technique pour l'isolation extérieure choisie

L'isolation par l'extérieur offre une grande variété d'aspects, du plus traditionnel au plus moderne, ce qui la rend compatible pour la rénovation de maisons anciennes. L'isolation par l'extérieur est la meilleure des solutions lorsque les enduits extérieurs sont défectueux. Elle permet de faire deux opérations en même temps : l'isolation et le ravalement. L'isolation par l'extérieur modifie complètement l'aspect extérieur du bâtiment et elle n'est donc pas toujours applicable. Avant tout projet, il faut consulter les règles d'urbanisme de la commune (plan local d'urbanisme et plan d'occupation des sols et

le règlement d'urbanisme local) pour connaître les contraintes esthétiques s'appliquant aux façades.

Il existe plusieurs solutions d'isolation thermique par l'extérieur. Parmi les principales, l'isolation sous enduit et l'isolation sous une vêtture ou un bardage ventilé. Nous avons opté pour la technique du bardage rapporté Klarsfeld et Langlais [2004] : l'isolant se place contre la façade en ménageant une lame d'air entre la peau extérieure et l'isolant, des détails quant à la lame d'air sont donnés en fin de paragraphe. Les solutions d'isolation thermique par l'extérieur s'intègrent dans les systèmes à lame d'air ventilée derrière tous types de bardages (plaques en fibre ciment, ardoises naturelles, dalles de pierre naturelle ou reconstituée, éléments de terre cuite, bardeaux de bois, panneaux de stratifié épais, vitrages clairs ou émaillés, panneaux photovoltaïques, résilles et bacs végétalisés,...). Dans ces conditions, les solutions d'isolation thermique par l'extérieur évitent tous risques de condensation pour l'isolation : les systèmes à lame d'air ventilée sont fiables et efficaces ; ils permettent une excellente évacuation de la vapeur d'eau. Elles s'appliquent sur les murs et façades et sont adaptées à tous types de bâtiments (tertiaire, résidentiel collectif, maison individuelle...), en neuf ou en réhabilitation. Le coût de cette technique est plus élevé que celui de l'isolation par l'intérieur (hors coût de ravalement).

Le bois (pin maritime) et un dérivé aggloméré (dérivé du bois imprégné de résines thermosensibles) ont été retenus comme panneau de parement extérieur pour notre bardage d'étude. Le bois est à la fois décoratif (il habille façades et sous faces de toiture au même titre qu'un bardage) et protecteur, le bois et ses dérivés sont des matériaux naturellement isolants. Le bois comme matériau isolant a une conductivité thermique une dizaine de fois plus faible que celle du béton et entre trois et quatre centaines de fois plus faible que celle de l'acier en fonction de son essence. Le bois a une diffusivité thermique basse. Un bâtiment à ossature bois se chauffe facilement. L'air y est sec et sain, grâce au bois et à l'isolant aisément placé entre les montants de l'ossature. La température des parois est proche de celle de l'air ambiant, ce qui augmente le confort thermique. Les ponts thermiques sont limités. Par contre, le bois accumule peu la chaleur ; sa capacité thermique est moyenne. En pays froids, le bois est très apprécié pour les qualités citées ci-dessus mais en pays tropicaux humides, même s'il existe des microclimats, l'entretien du bois n'est pas très connu et les habitants supportent mal l'utilisation du bois qui peut pourrir Stagno [2009] et accumule mal la fraîcheur de la nuit. Or, l'architecture en bois est légère et non inertielle (structure légère qui puisse être déchargée thermiquement par la ventilation naturelle) donc, cette capacité devrait être prise en compte pour valoriser le bois comme matériau de construction en milieu tropical. Le bois est très performant en terme d'isolation thermique, bon marché, un produit naturel et recyclable. Le bois est un produit écologique et économe en énergie : A performance égale, le bois représente pour sa mise en œuvre dans la construction deux fois moins d'énergie que le béton et cinq fois moins que l'acier, en intégrant du bois dans la construction, on fait donc un geste pour l'environnement. Un bardage en bois, associé à un isolant extérieur permet d'améliorer notablement l'isolation thermique et de satisfaire aux exigences actuelles. Il permet également de masquer efficacement les fissures et d'éliminer les ponts thermiques qui peuvent entraîner d'importantes pertes énergétiques. Enfin, il améliore l'isolation phonique d'un bâtiment.

L'aggloméré ou dérivé du bois a été choisi comme panneau de parement extérieur et est composé d'éléments minces à base de bois. C'est un revêtement extérieur léger de faible épaisseur, avec bonne tenue aux UV, résistant aux chocs et rayures. Le rôle de l'aggloméré en copeaux ou particules de bois comme parement extérieur est à la fois décoratif (il habille façades et sous faces de toiture au même titre qu'un bardage) et protecteur (il fait barrière aux chocs et aux intempéries). A l'instar du bardage, l'aggloméré dispose de qualités environnementales certaines. Il contribue à la conservation des forêts puisque son utilisation permet de récupérer les déchets du bois que l'on met en œuvre au lieu d'abattre d'autres arbres. L'aggloméré permet aussi des économies d'énergie par l'isolation thermique et un confort acoustique par l'amortissement des bruits.

Les matériaux utilisés le plus souvent dans les régions froides pour l'isolation des bâtiments comme le polystyrène, fibre de verre et barrières rayonnantes sont choisis à cause de leur basse conductivité thermique et leur habilité à bloquer la conductivité du flux thermique, mais les recherches se poursuivent pour leur utilisation dans les bâtiments en climat humide tropical comme les Antilles et Guyane Soubdhan *et al.* [2005] puisque leur efficacité à réduire le flux thermique à travers le toit n'a pas encore été démontré ; surtout que les configurations utilisées sont celles utilisées dans le climat tempéré. Or les bardages thermiques en bois sur les façades peuvent être mis sur toutes les constructions (béton, bois, terre cuite, ...) et sans autre isolation sur le mur porteur.

Une situation expérimentale verra le bardage sur une structure béton-parpaing. Les structures et ouvrages en béton armé sont soumis, dès leur mise en œuvre, à des contraintes d'ordre mécanique L'hostis *et al.* [2009], (charges, sollicitations diverses externes ou internes, dont le vent, les variations de température, etc.) ou environnementales (atmosphère, eau de mer, etc.). Les premiers produits industriels en béton sont apparus dans la seconde partie du XIX^e siècle, Fatre [2007], lorsque le béton armé a commencé à se développer et de nos jours les usines disposent de moyens de fabrication élaborés et très automatisés, leur permettant de fournir des produits de qualité aux caractéristiques régulières. Très résistant et très cassant. Il est possible de le mélanger avec de l'acier pour donner à l'ensemble les capacités cumulées des deux matériaux. Dans les régions froides, le béton est utilisé dans la construction des édifices avec des isolants pour mieux réguler ses capacités d'accumulateur et de bon conducteur thermique. Dans les pays tropicaux et humides, les maisons construites avec les briques de ciment sont de plus en plus présentes et sont considérées comme permanentes. Or, le béton est un produit à utiliser en considérant ses propriétés thermiques. Certes, la prolifération des maisons en béton permet de lutter contre le phénomène des bidonvilles et ainsi améliorer l'urbanisation. Donc, les maisons en ciment sont particulièrement chaudes et elles sont la plupart du temps équipées partiellement ou entièrement de climatiseurs et ceci fait qu'elles ont une consommation d'énergie très élevée. En plus, il est très rare de trouver des maisons entourées d'arbres ou autres types d'ombrage pour limiter les apports solaires directs. L'ajout de l'isolation extérieure avec bardage rapporté pour la minimisation des charges solaires à travers l'enveloppe du bâtiment est une bonne option pour la diminution de la consommation d'énergie.

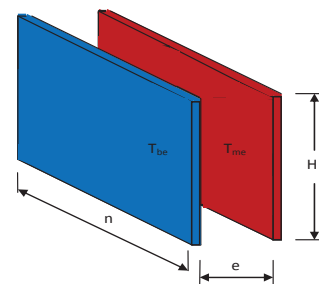
Le choix du bardage bois est conforté par le fait de pouvoir assurer son entretien. Le degré d'exposition du bois selon l'usage conditionne sa durée de vie et sa facilité d'entretien. Le bois ne doit pas être en contact avec de l'eau stagnante, ni avec le sol. Le

choix de la bonne essence de bois selon sa durabilité et son utilisation (bardage, terrasse...), est primordial comme certains bois tropicaux tels que l'Ipé, le Bangkirai ou encore le Teck et les bois naturellement résistants : Douglas, Châtaignier, Mélèze, Robinier. Si nécessaire, il faut appliquer un traitement de préservation avec une finition adaptée. D'autres essences peuvent être utilisées, mais nécessitent des traitements contre les insectes et les champignons, qui peuvent être appliqués en usine. De nouvelles techniques de préservation sont en développement et semblent prometteuses, comme le bois traité haute température ou par oléo-thermie. Laissé naturel, le bois acquiert, sous l'effet des UV, une patine protectrice de couleur argentée. Pour conserver l'aspect original du bois, ou lui donner une autre couleur, il faut une couche protectrice de peinture ou de lasure. Certaines finitions contiennent aussi des biocides qui protègent le bois contre les attaques des champignons, moisissures et insectes. Avec un bois bien choisi et bien mis en œuvre, l'entretien est rapide, économique et durable. Les produits microporeux en phase aqueuse : non filmogènes, laissant le bois respirer, sont plus sains et préservent l'environnement. Certains produits sont garantis 5, voire 10 ans. Certains produits et certaines essences nécessitent une sous-couche (bois acides, gras, à fort tanin ou très résineux...). Plus une peinture ou une lasure est chargée en pigments (couleur), plus longtemps elle protège le bois. Mais, une teinte trop sombre entraîne un échauffement du bois lorsqu'il est exposé au soleil. A éviter, donc, les vernis transparents... et les peintures noires ! Avant de passer une couche d'entretien, on doit poncer grossièrement ou brosser le bois : une trop grande superposition de couches risque à la longue de l'empêcher de respirer.

Abordons maintenant l'élément clef du système de bardage qu'est la lame d'air. Cette lame d'air est réalisée par des tasseaux fixés verticalement, elle peut être ventilée ou non et modifiable en jouant sur l'épaisseur des tasseaux. La lame d'air est dotée d'une grille contre les insectes et pendant le fonctionnement du dispositif de bardage, elle peut être confrontée aux difficultés de gestion de la ventilation si jamais elle n'est pas dotée de clapets de blocage de l'entrée et la sortie pour que la lame d'air devienne ventilée en été et fermée en hiver. Notre étude s'intéresse aux transferts thermiques dans tous les composants du dispositif de bardage, parmi lesquels nous avons la lame d'air circulante ou non circulante et qui joue un rôle très important quant à la gestion des flux de chaleur. Pour analyser l'impact de la lame d'air sur les performances thermiques du dispositif de bardage, il est essentiel de déterminer sa fonction :

- La Figure 1.3, ci-contre représente deux plaques parallèles chauffées différemment. La lame d'air ventilée est caractérisée par l'épaisseur e , la hauteur H et la largeur n . La lame d'air ventilée évacue de l'air chaud qui se forme dans le canal entre plaques. En conditions estivales, l'écoulement dans la lame d'air se fait par l'effet thermosiphon c'est-à-dire par circulation de l'air de façon naturelle grâce à la variation de la densité du fluide soumis à un gradient de température.

Figure 1.3 : Plaques parallèles chauffées différemment

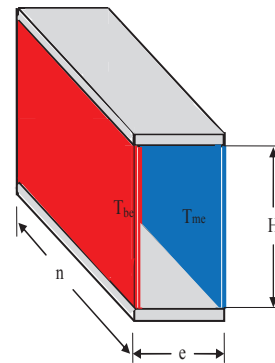


Ce mouvement de convection naturelle est fonction du flux solaire incident, du rapport d'aspect A ainsi que des sections d'ouvertures à l'entrée et à la sortie. L'écoulement dans la troisième direction n est considéré négligeable surtout quand la

longueur de la troisième dimension n est largement supérieure à celle entre les parois actives.

Figure 1.4 :

Cavité chauffée différentiellement



- Par le blocage des clapets d'entrée et de sortie (Figure 1.4), la lame d'air devient une cavité verticale fermée allongée chauffée différentiellement.

La différence de températures entre les deux parois chaude et froide transporte l'énergie à partir du mur chaud vers le mur froid, Balocco [2001]. Une étude bibliographique nous a permis de déterminer que le transport de chaleur à l'intérieur de la cavité fermée se produit uniquement par convection naturelle.

Le rayonnement n'est pas pris en compte et les lames d'air fermées intégrées dans les enveloppes du bâtiment présentent des nombreuses configurations et elles peuvent être horizontales, verticales et inclinées. Les corrélations sont nombreuses dans la littérature et ceci en fonction de la configuration, de la position de la paroi chauffée, de l'angle d'inclinaison de la lame et du rapport d'aspect. En fonction des valeurs de la différence des températures et des dimensions de la cavité parallélépipédique, on peut avoir une recirculation du flux en convection naturelle ou une stratification thermique au sein de la cavité. Cette stratification est d'autant plus forte que le rapport d'aspect est petit. L'écoulement dans la troisième direction est considéré négligeable surtout quand la longueur de la troisième dimension n est largement supérieure à celle entre les parois actives.

Notre étude est axée sur les parois verticales et les lames d'air horizontales et inclinées ne sont pas présentes dans les complexes de parois verticales. Pour cela, nous nous intéresserons aux lames d'air verticales.

1.5 Le fonctionnement du système de bardage

Le type d'isolation d'enveloppe choisi pour cette étude est le système de bardage qui peut être utilisé en toute saison donc, facile à utiliser sous toutes les latitudes avec quelques adaptations dans les configurations et agencement des matériaux.

La Figure 1.5 présente le schéma de principe d'un bardage thermique. Il est constitué de deux parois séparées par une couche d'air ventilée par convection naturelle. La circulation d'air permet d'éliminer le flux énergétique reçu par les parois du bâtiment tout en améliorant le confort intérieur par la ventilation d'air ainsi créée.

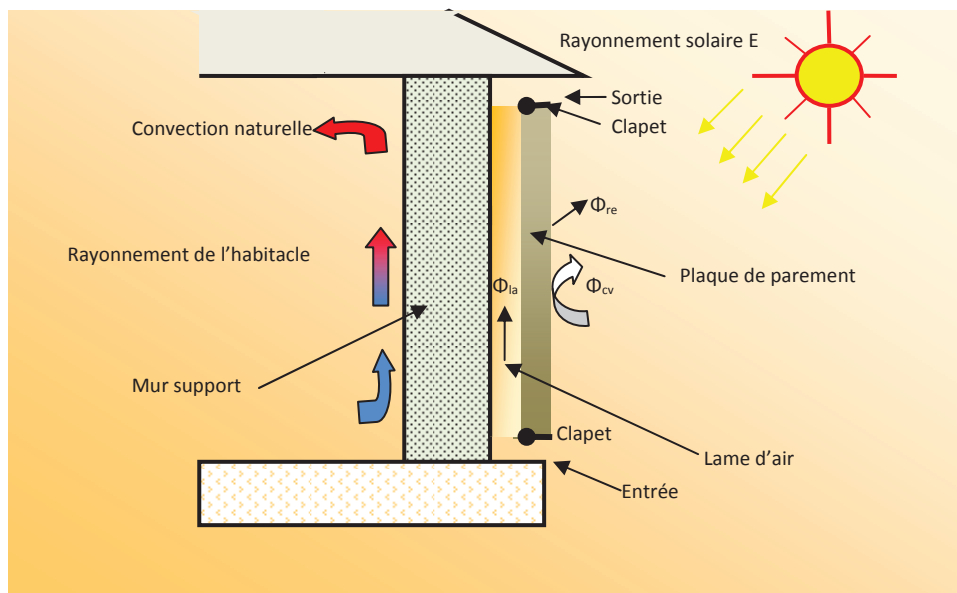


Figure 1.5 : Schéma de principe du dispositif de bardage

La première paroi ou plaque de parement est en bois absorbant le rayonnement solaire. Elle doit par ailleurs résister aux températures et aux conditions climatiques extérieures. La deuxième paroi est une paroi isolante permettant de limiter la propagation de la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur de l'habitation et vice-versa. Elle peut être en ossature bois ou en béton.

Par suite de l'existence d'une différence de température entre la paroi absorbante et la paroi isolante, une circulation d'air est possible entre les deux parois si des ouvertures sont pratiquées aux extrémités du bardage, respectivement en position basse vers l'intérieur et en position haute vers l'extérieur.

Le fonctionnement du bardage thermique est par suite le suivant :

- La paroi absorbante ou plaque de parement s'échauffe dès qu'elle capte le rayonnement solaire. Une partie du flux solaire absorbé est transmise par convection (Φ_{cv}) et par rayonnement (Φ_{re}) au milieu extérieur (Figure. 1.5). L'autre partie est absorbée et transportée par conduction vers la surface arrière au contact de la lame d'air (Φ_{la}) ;
- L'énergie absorbée contribue au chauffage de la couche d'air entre la plaque de parement et la paroi isolante. Cet échauffement provoque les phénomènes décrits au paragraphe précédent ;
- L'énergie reçue par rayonnement depuis l'intérieur de la plaque de parement par le mur isolant est transmise par conduction vers l'intérieur de l'habitation et par convection à la lame d'air ;
- Dans la partie inférieure, l'air frais entre par l'ouverture existante entre la plaque absorbante et le sol. L'air est évacué chaud par la partie supérieure de la plaque extérieure ;

- Les échanges convectifs et radiatifs entre le mur support et la lame d'air, génèrent des échanges thermiques conductifs dans le mur et échanges thermiques convectifs entre le mur et l'habitation.

1.6 Positionnement du travail développé dans ce mémoire

Comme souligné au paragraphe précédent, sur la surface extérieure de la plaque de parement, nous avons de la convection naturelle et du rayonnement solaire incident, de la plaque et de l'environnement, de la conduction dans la plaque de parement et le mur isolant et dans la lame d'air, la convection naturelle générée par la différence de températures entre la surface intérieure de la plaque de parement et la surface extérieure du mur isolant et le rayonnement entre ces deux surfaces.

La convection naturelle entre la plaque de parement et la surface extérieure du mur isolant est la convection naturelle entre une plaque chaude (le parement) et une plaque froide (le mur isolant) dont Elenbaas [1942] a été le premier à présenter une étude détaillée de convection par la poussée hydrostatique de l'air pour une telle configuration avec plaques isothermes et plusieurs chercheurs ont confirmé ses résultats. Aung [1972] a eu le mérite d'étendre la recherche sur les plaques chauffées de manière asymétrique (une plaque chaude et l'autre froide). Churchill et Usagi [1972] ont proposé des corrélations pour les différents processus et, Bar - Cohen et Rohsenow [1984] ont proposé des corrélations optimales pour plusieurs conditions à la limite.

Plusieurs travaux ne faisaient pas la différence entre les applications thermiques solaires, les systèmes de refroidissement des circuits électroniques, les réacteurs nucléaires et le bâtiment, et traitaient le problème comme phénomène de convection naturelle entre plaques, en particulier en ignorant les effets du transfert thermique par rayonnement et pertes thermiques à travers la plaque absorbante, Burek *et al.* [2006]. Cependant, plusieurs recherches expérimentales et numériques menées sur les applications solaires comme la climatisation passive des maisons et les séchoirs solaires ont apporté des réponses aux transferts thermiques entre plaques dans le bâtiment. Les études sur la performance thermique et énergétique des bâtiments ont permis d'étudier plusieurs configurations et distributions des composants à l'exemple d'Ozel *et al.* [2007] et les performances thermiques des murs composites, à l'instar de Raymond *et al.* [2007], les réponses apportées permettent de constater l'influence de chaque paramètre analysé.

Les pays industrialisés ont menées des études dans le secteur du bâtiment qui leur ont permis d'élaborer des réglementations thermiques, et des labels de qualité environnementale ou de performance énergétique (HQE, maisons passives, bâtiments basse consommation), Piot [2009] et, ceci a amené à des nouvelles préconisations d'isolation thermique. Plus récemment, en France, le Grenelle de l'environnement a confirmé le potentiel du secteur du bâtiment en termes d'économie d'énergie et l'intérêt porté à l'utilisation de matériaux dits « propres » et « durables ».

La meilleure compréhension de la performance thermique et énergétique des bâtiments et des mécanismes des transferts nécessite plus de données expérimentales à

l'échelle du matériau, du mur aussi bien qu'à l'échelle du bâtiment. Les structures ventilées en convection naturelle ou forcée, sont parmi les solutions les plus complexes et discutées.

Notre travail s'inscrit dans cette démarche : nous avons choisi une approche expérimentale, à l'échelle de la paroi puisque la connaissance du comportement thermique d'une paroi en réponse à des sollicitations diverses, Lefebvre [1994] est donc utile à la compréhension du comportement thermique d'un bâtiment dans son ensemble. L'analyse du dispositif de bardage avec deux parements en bois de différentes qualités, deux supports muraux différents et des paramètres géométriques (hauteur, largeur et épaisseur) de la lame d'air, nous permettront d'accéder à des données supplémentaires pour mieux comprendre le comportement de ces façades solaires de grande échelle. La présente étude reporte une série d'expériences conduites pour mesurer les écoulements dans les dispositifs de bardage. L'objectif étant de présenter des données qui peuvent être utiles pour caractériser les flux d'air et températures dans les systèmes de grande échelle.

Chapitre 2 : PRESENTATION DES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

La partie expérimentale de ce travail de recherche a pour but d'accéder à des données, de les analyser et de dégager des comportements. L'analyse détaillée du comportement thermique des composants du dispositif mural dans les conditions climatiques naturelles, doit nous permettre de comprendre les interactions entre les phénomènes thermo physiques significatifs dans un tel dispositif. La lame d'air circulante évacue le flux thermique reçu par la plaque de parement et la non circulante utilise la différence de température des parois de la cavité pour transporter l'énergie à partir du mur chaud vers le mur froid, afin d'améliorer le confort intérieur.

2.1 Cahier des charges du dispositif expérimental et approche expérimentale

L'installation expérimentale décrite ici a pour objectif de permettre l'étude du comportement thermique d'un système de bardage. A cet effet, nous nous sommes imposé un cahier des charges pour la construction du dispositif. Celui – ci doit :

- Etre représentatif d'une vraie façade de maison avec bardage.
- Comporter une plaque de parement et des tasseaux qui doivent pouvoir être démontés et réinstallés aisément et sans dommages, afin de pouvoir réaliser des modifications dans la configuration du dispositif de bardage.
- Comporter une instrumentation qui doit permettre d'étudier divers détails constructifs comme le type de bardage, la configuration de la lame d'air (ouverte ou fermée) et son épaisseur.
- Comporter des capteurs : de rayonnement solaire, de vitesse pour l'air ambiant (vent) et dans la lame.
- Comporter une instrumentation qui doit permettre d'étudier les transferts thermiques sur trois hauteurs de la lame d'air afin de visualiser les écoulements à l'entrée, en hauteur médiane et à la sortie.

Dans le but d'étudier le comportement des dispositifs de bardage avec plaque de parement en pin maritime et en aggloméré de pin, nous avons utilisé l'approche expérimentale sur une mini façade donnant au Sud pour mettre en évidence les performances thermiques de ces dispositifs de bardage dans les conditions réelles.

Les mesures ont été effectuées sur deux dispositifs de bardage afin de comparer et quantifier l'effet apporté par l'éclairement solaire, la qualité de la plaque de parement, la lame d'air ouverte et fermée, et son écartement qui a une forte influence sur le régime d'écoulement.

Afin d'obtenir des mesures cohérentes des paramètres qui caractérisent les échanges thermiques dans le dispositif mural, les mesures ont été effectuées dans deux environnements d'essais, pendant deux en trois séquences, de septembre 2009 à avril 2011. En premier lieu, les performances thermiques du dispositif de bardage sur une maison à ossature bois, ont été mesurées à Levignacq dans les Landes. En second lieu, deux campagnes de mesures, sur un mur en béton, ont été menées sur le site ENSAM à Talence.

2.2 Description des dispositifs expérimentaux et de leur instrumentation

2.2.1 Dispositif de Levignacq

Afin d'évaluer les qualités thermiques et les performances énergétiques des bardages dans des contraintes climatiques variées, la première séquence de mesures a eu lieu en milieu rural, sur le site de Levignacq (séquence A). La figure 2.1 illustre la façade Sud de la maison à ossature bois et le dispositif expérimental.



Figure 2.1 : A Façade Sud de la maison expérimentale, B Sonde de rayonnement et capteur de température ambiante

Le modèle proposé (Figure 2.2) est une schématisation de la partie courante d'une paroi en bois réelle (les montants ne sont pas inclus) comprenant les éléments suivants :

Le bardage bois (0,021 m) composé de lames de pin maritime, séchées avant finition, rabotées puis brossées avant mise en peinture, est assimilé à un matériau homogène et opaque. La lame d'air assure la ventilation de l'isolation derrière le bardage bois a une épaisseur e égale à celle des tasseaux. La lame d'air est dotée d'une grille contre les insectes.

Le mur isolant, composé de l'écran pare – pluie, du contreventement, de l'isolation thermique (laine de verre) et du pare vapeur étant un mur composite est isolé sur ses faces intérieure (coté lame d'air) et extérieure (intérieur de la maison) est considéré comme adiabatique. Les transferts de chaleur superficiels par convection ou rayonnement vers l'ambiance intérieure (habitable) sont caractérisés avec un coefficient global de transfert h_{zone} , tandis qu'en milieu extérieur et dans la lame d'air, les coefficients d'échange par convection et par rayonnement sont considérés en fonction du type de transfert, h_{cv} pour la convection et h_{rad} pour le rayonnement.

En fonction des sollicitations externes, le mur stocke et déstocke de la chaleur. L'ensemble des températures varie, l'amplitude de ces variations, et notamment celle de la température de l'air dans l'habitation, est directement liée à la notion de confort. Plus celle-ci sera faible, plus le local sera confortable.

La différence entre la température de l'air ambiant et celle de l'air dans le canal entre plaques est la force motrice du flux d'air dans la lame d'air.

La Figure 2.2 ci-contre présente le schéma en coupe de la paroi verticale de la séquence A, la partie courante (c'est-à-dire en dehors des montants) est composée comme suit (en partant de l'intérieur vers l'extérieur) :

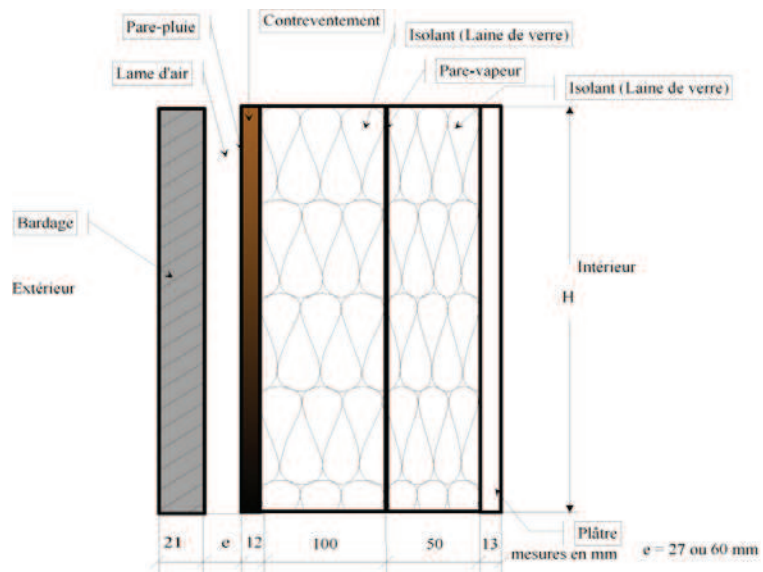


Figure 2.2 : Coupe verticale du mur composite

- Parement intérieur : plaque de plâtre (0,013 m) ;
- Isolant : laine de verre de conductivité nominale de 35 mW/m.K (0,050 m) ;
- Pare – vapeur : Assure l'étanchéité à l'air et fixé sur la paroi verticale par l'utilisation d'un ruban adhésif ;
- Isolant : laine de verre de conductivité nominale de 35 mW/m.K (0,100 m) ;
- Contreventement : panneau de particules agglomérées (0,012 m) ;
- Pare pluie : film « Ubbink multivap », étanche à l'air et à l'eau liquide, perméable à la vapeur ;
- Lame d'air (0,027 m et 0,060 m) ;
- Bardage en pin maritime (0,021 m).

Cette composition constitue la configuration dite « de référence » pour les maisons à ossature bois. La plaque de plâtre constitue le parement intérieur. On peut noter l'absence de matériau à forte capacité calorifique donc, ce montage présentera peu d'inertie.

Le dispositif expérimental utilisé pour ce travail est illustré par la Figure 2.3. Une sonde de rayonnement global (17) est installée à l'extérieur sur le mur à côté du dispositif de bardage thermique. Deux thermocouples sont aussi à l'extérieur, l'un dans l'air (3) pour mesurer la température ambiante et l'autre (1) sur la surface extérieure de la plaque de parement. La vitesse d'écoulement de l'air entre la plaque de parement et le mur isolant et sur la surface extérieure de la plaque de parement est relevée par l'anémomètre à fil chaud (18).

Dans la lame d'air, la vitesse de l'air est mesurée au milieu de la lame d'air en hauteur médiane et à la même hauteur à l'extérieur. Pour mesurer la température interstitielle, les thermocouples reliés à la centrale d'acquisition sont mis dans le canal en bas (3, 6, 9), au milieu (16, 7, 10) et en haut (4, 8, 11) et divisent le canal en trois zones qui permettent de visualiser les échanges thermiques dans le champ de l'écoulement.

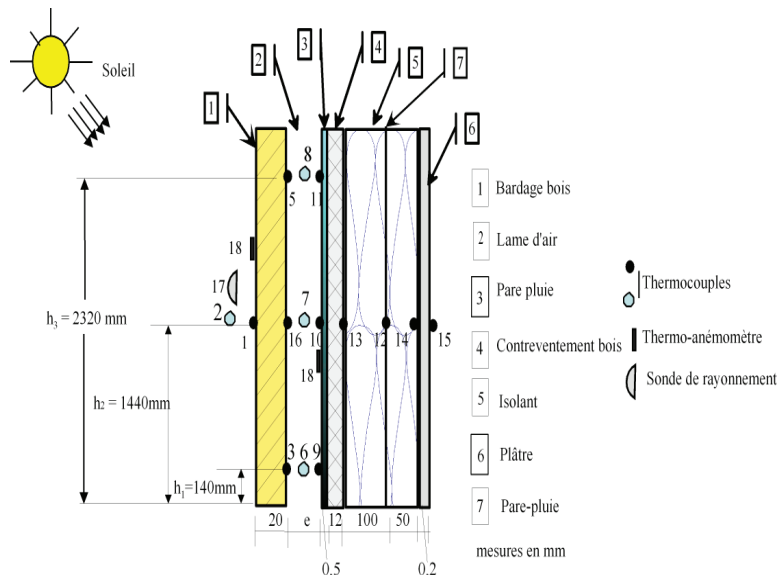


Figure 2.3 : Placement des capteurs dans la paroi de la maison à ossature bois

Les thermocouples (6, 7, 8) représentés en bleu dans la lame d'air, symbolisent les capteurs de température dans la lame d'air. Les capteurs sont reliés aux centrales d'acquisition et celles-ci sont reliées à un ordinateur. La mesure de températures dans le mur isolant s'effectue en position médiane sur les surfaces de contact entre les composants du mur (thermocouples 12 – 15).

La mise en place d'un dispositif expérimental permet de :

- Mesurer la température sur les faces interne et externe du bardage et dans l'air interstitiel.
- Mesurer le flux de rayonnement global incident sur la face externe du bardage,
- Mesurer la vitesse de l'air interstitiel (effet cheminée).

Pour apporter quelques éléments quant au rôle du rapport d'aspect (e/H) sur les transferts thermiques, les mesures s'effectuent avec deux épaisseurs de lame d'air tout en maintenant la même hauteur du système de bardage.

2.2.2 Dispositif du site ENSAM – Talence

Afin d'étudier la réponse aux sollicitations climatiques du dispositif de bardage en conditions urbaines, un double dispositif de bardage dont les lames d'air verticales présentent un espace réglable de 27 et 60 mm (les mêmes qu'à Levignacq), est limité par un mur composite non chauffé et fixé sur une paroi en béton. Les plaques de parement sont en deux matériaux différents, l'un en pin maritime et l'autre en dérivé (aggloméré) de bois. Ce double dispositif, a été mis en place sur la façade Sud d'un bâtiment sur le site ENSAM

à Talence. L'agencement de la partie fixe du dispositif est différent de celui de la campagne des mesures à Levignacq et est constitué de la manière suivante :

- Bardage bois : en pin maritime (0,021 m d'épaisseur) et en aggloméré (0,009 m d'épaisseur)

- lame d'air : (0,027 m et 0,060 m) en deux configurations (ouverte et fermée) ;
- Pare – pluie ;
- 2 plaques de plâtre (0,013 m chacune) ;
- Isolant : laine de verre de conductivité nominale de 35 mW/m.K (0,070 m) ;
- Mur en béton : 0.10 m d'épaisseur et 1 W/mK de conductivité thermique.



Figure 2.4 : Photographie illustrant la façade Sud du bâtiment et le dispositif expérimental site ENSAM

Ce double dispositif a été utilisé pour les mesures en conditions climatiques estivales (séquence B) et hivernales (séquence C). Le changement de l'agencement des composants du mur isolant doit permettre de connaître l'impact de l'isolation thermique sur l'absorption et la conservation de la chaleur dans la lame d'air et à l'intérieur de l'habitable.

Le schéma en coupe du dispositif est proposé ci-contre (Figure 2.5). Pour assurer un fonctionnement saisonnier du dispositif de bardage, un dispositif qui transforme la lame d'air circulante en cavité parallélépipédique fermée et qui permet d'accumuler de la chaleur en période froide a été adapté et ceci, pour une utilisation rationnelle de la ventilation de la lame d'air en fonction de la saison.

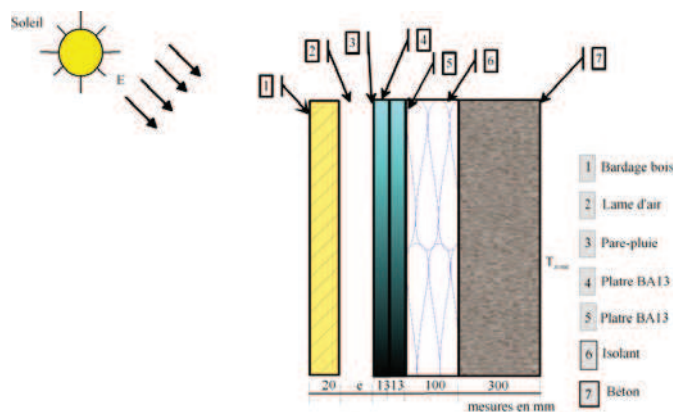


Figure 2.5 : Schéma en coupe de la paroi verticale du dispositif expérimental du site ENSAM

Pour pouvoir comparer les mesures expérimentales et obtenir des résultats fiables, le placement des capteurs a été réalisé d'une manière similaire à celui du dispositif de Levignacq en ce qui concerne l'extérieur du dispositif, la surface intérieure de la plaque de parement, le milieu de la lame d'air et la surface extérieure du mur isolant. Mais considérant le remplacement du contreventement par deux plaques de plâtre dans le mur isolant, des capteurs de température ont été installés à trois hauteurs entre les deux plaques (capteurs 12, 13, 19).

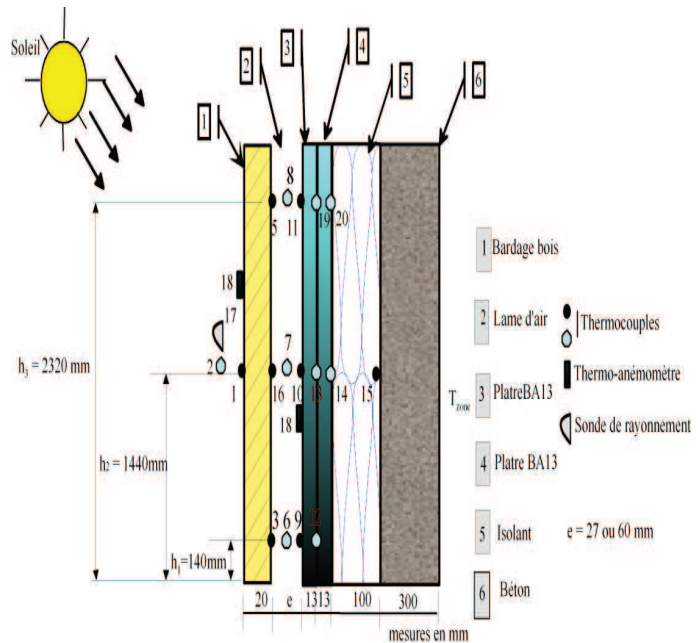


Figure 2.6 : Placement des capteurs dans la paroi du dispositif expérimental du site ENSAM.

A la hauteur médiane, les thermocouples ont été installés à différentes profondeurs sur différents éléments qui constituent le mur composite (capteurs 13 – 15). Le thermocouple (20) permet de mesurer la température entre la deuxième plaque de plâtre et la laine de verre à la sortie du dispositif du bardage. Les capteurs de vitesse d'air entre plaques et de rayonnement solaire, ont été placés dans des endroits similaires au dispositif de Levignacq, à savoir, la sonde de rayonnement (17) sur la façade à mi-hauteur du bardage thermique et le thermo-anémomètre aussi à mi hauteur entre plaques.

Le thermocouple 15 qui permet de mesurer la température dans l'habitable dans le dispositif expérimental de Levignacq, est placée entre l'isolant et le béton dans ce dispositif expérimental.

2.3 Caractérisation des matériaux

Les grandeurs caractéristiques du matériau au sein duquel les transferts se déroulent déterminent son comportement thermique. Considérant que les matériaux utilisés en construction sont très divers, il est donc souvent nécessaire de procéder à des mesures afin de caractériser un produit donné. C'est la démarche que nous avons adoptée.

Les propriétés mesurées sont utilisées comme données d'entrée pour les simulations numériques (voir chapitre 4), afin de valider le modèle développé en minimisant les erreurs dues aux incertitudes sur les propriétés des matériaux employés. Les différentes mesures sont rassemblées sur le tableau suivant :

Matériau	Valeurs des grandeurs caractéristiques				
	C_p ¹ (J/kg.K)	ρ ² (kg/m ³)	α ³	ϵ ⁴	λ ⁵ W/m.K
Panneau de particules	1400	700		0,88	0,107
Bardage 1 (agglo pin)	1800	1100	1	0,96	0,289
Bardage 2 (pin)	1300	560,3	0,7	0,84	0,201
Plâtre BA13	1008	825	0,9	0,9	0,250
Laine de verre	1000	19,4			0,032
Béton	800	2200	0,9	0,9	1
Film pare-pluie	2300	130		0,75	2,3

¹ Capacité thermique massique

² Masse volumique

³ Absorptivité solaire

⁴ Emissivité

⁵ Conductivité thermique

Tableau 2.1 : Synthèse des mesures effectuées sur les matériaux utilisés dans le dispositif expérimental

2.4 Eléments clefs dans l'obtention des données

Le pyranomètre

Les mesures de rayonnement solaire ont été effectuées sur les deux sites avec le même pyranomètre, à savoir, la sonde de rayonnement global ALMEMO du type FLA613GS. Cette sonde a une plage de mesure de 0 à 1200 W/m² et une tête de mesure en boîtier aluminium anodisé à dôme plastique laissant passer les UV. Le système est protégé contre la pluie et les projections d'eau, avec déshydratant pour éviter la condensation sur la paroi interne du dôme donc, il convient particulièrement aux mesures climatiques et météorologiques. La récupération des données de rayonnement est autonome puisque la sonde dispose d'un boîtier d'acquisition indépendant.

La sonde de rayonnement global (1) et le capteur à infrarouge (2) visualisés Figure 2.7



Figure 2.7 : La sonde de rayonnement global (1) et le capteur à infrarouge (2)

Le thermo-anémomètre

La vitesse d'écoulement de l'air entre la plaque de parement et la paroi absorbante a été mesurée à l'aide d'un anémomètre à fil chaud et aussi à la surface extérieure de la plaque de parement. L'anémomètre thermique possède une résistance qui est chauffée à une température constante supérieure à la température ambiante. La vitesse d'écoulement est mesurée en se basant sur la puissance de chauffe nécessaire. Cette mesure étant fortement liée à la température ambiante, celle-ci est mesurée avec une résistance de précision et automatiquement compensée.

Dans les dispositifs, l'anémomètre utilisé est du type ALMEMO FVA605TA1D unidirectionnel, sa plage de mesure évolue entre 0,01 à 1 m/s , la résolution maximale : 0,001 m/s , la température d'utilisation varie entre 0 et 40°C avec une précision de $\pm 1,5\%$ de la plage de mesure. Pour le relevé des mesures, l'anémomètre est positionné à mi-hauteur de l'espace entre le bardage et le mur.

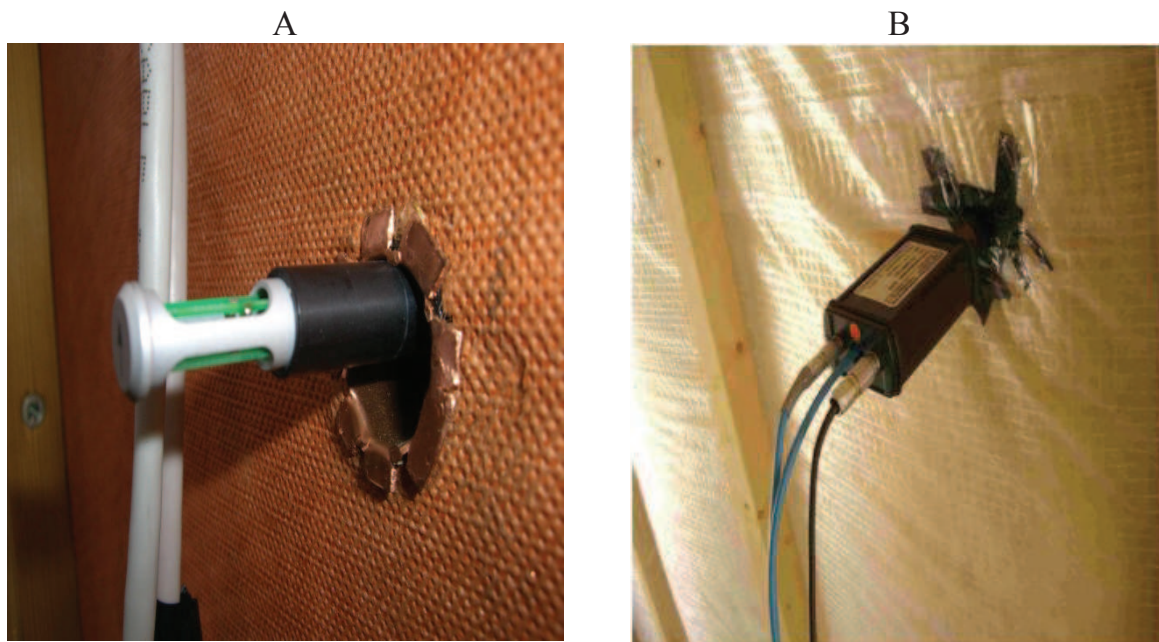


Figure 2.8 : Thermo-anémomètre donnant : A) dans la lame d'air, B) dans l'habitacle

Le système d'acquisition

L'acquisition des données (Figure 2.9) se fait par la lecture et l'enregistrement des tensions délivrées par chacun des capteurs. Ce double travail est effectué par le biais de centrales d'acquisition. Les centrales effectuent une mesure par minute. Les fichiers de données enregistrent donc une valeur par minute.



Figure 2.9 : Les centrales d'acquisition ALMEMO (1) et Delta Ohm HD 9021

Trois centrales d'acquisition sont utilisées : une centrale ALMEMO 25904S, une centrale Delta Ohm HD 9021 et la centrale EcoLogger. Ces centrales représentent le maillon final de la chaîne d'acquisition. Les voies de mesures conditionnent la quantité des centrales.

La centrale ALMEMO 25904S dispose de 4 entrées et 4 canaux par entrée, 2 sorties interface un écran graphique, menus de programmation donc, destiné à relever divers paramètres, horloge temps réel, mémoire interne de 59 ko. La centrale Delta Ohm HD 9021 est liée uniquement à la sonde de rayonnement global.

Développée par le centre d'innovation et transfert de technologie Ecocampus, l'EcoLogger (Figure 2.10) est une centrale d'acquisition de données composée de 16 voies de mesure (8 par face) et permet de mesurer dans ou sur différents matériaux la température.



Chaque voie de mesure peut recevoir des informations d'un capteur externe, branché au boîtier via un port RJ45 et grâce à un câble Ethernet.

La centrale EcoLogger présente l'avantage d'avoir plusieurs entrées ce qui permet de réaliser plusieurs mesures en même temps.

Figure 2.10 : La centrale d'acquisition EcoLogger

2.5 Eléments clefs du bardage

Utilisation du type de plaque de parement :

Considérant l'origine du problème à résoudre, nous avons choisi le bois (pin maritime) qui est une plaque de parement épaisse et son aggloméré (dérivé du bois imprégnés de résines thermodurcissables) qui est mince. La caractérisation expérimentale des performances de ces deux matériaux doit permettre de préciser l'influence de la plaque de parement extérieur sur le dispositif de bardage. Par les dimensions de deux matériaux, la plaque de parement épaisse a un déphasage plus important que la plaque en aggloméré, entre le moment où la chaleur arrive sur sa face extérieure et le moment où elle atteindra l'autre face.

Les plaques de parement en bois sont soumises aux intempéries et à des sollicitations périodiques journalières à savoir, les variations de la température extérieure et de l'ensoleillement. Donc, leur comportement thermique face aux variations climatiques affecte le fonctionnement du dispositif dans son ensemble. C'est pourquoi, les plaques de parement en pin maritime et en dérivé du bois qui n'ont pas seulement des différences d'épaisseur mais aussi des conductivités et émissivités thermiques différentes, auront aussi des comportements thermiques différents. Par conséquent, le choix d'une plaque de parement pour un usage précis sera fonction de son comportement thermique.

Typologie de la lame d'air :

La plaque de parement absorbe de la chaleur qu'elle transfère à la lame d'air par convection naturelle et celle-ci génère un flux de chaleur qui évacue la chaleur accumulée dans la lame d'air. Mais, cette évacuation peut se dérouler avec une vitesse plus ou moins grande et ceci en fonction des écarts de températures entre l'entrée et la sortie des plaques et aussi entre les plaques. En outre, cette chaleur accumulée peut ne pas être évacuée mais utilisée pour chauffer l'habitable en conditions hivernales.

C'est pourquoi, connaître le comportement de la lame d'air est un facteur très important dans l'utilisation rationnelle d'un bardage thermique. Pour ceci, divers systèmes constitutifs de la lame d'air ont été testés, à savoir, deux épaisseurs de lame d'air (mince et épaisse) et trois configurations des surfaces d'émissivité différentes forment le canal entre plaque de parement et le mur isolant. Deux configurations géométriques de lame d'air (ouverte et fermée).

2.6 Conditions climatiques des séquences

Les essais ont été menés dans deux environnements et conditions climatiques naturelles. Le tri des journées s'est effectué en fonction de conditions météorologiques puisque l'éclairement solaire est le moteur du bardage thermique, les journées représentatives sont celles dont l'état du ciel est clair. Les valeurs maximales, moyennes et minimales de l'éclairement solaire et de la température ambiante sont les paramètres de référence pour la classification des essais. Les différentes périodes présentées ci-après (appelées par la suite « séquences ») correspondent à des périodes saisonnières. Elles sont décrites de la manière suivante :

2.6.1 Séquence estivale de Levignacq (séquence A)

Les mesures ont été menées sur la configuration de paroi de référence présentée au chapitre 2.3.1. La plaque de parement est en pin maritime et deux épaisseurs de lame d'air ont été testées en configuration unique de lame d'air ouverte. La lame d'air est formée par la surface intérieure du pin maritime peinte en blanc et du pare – pluie : film « Ubbink multivap ». La classification a été faite selon le schéma suivant :

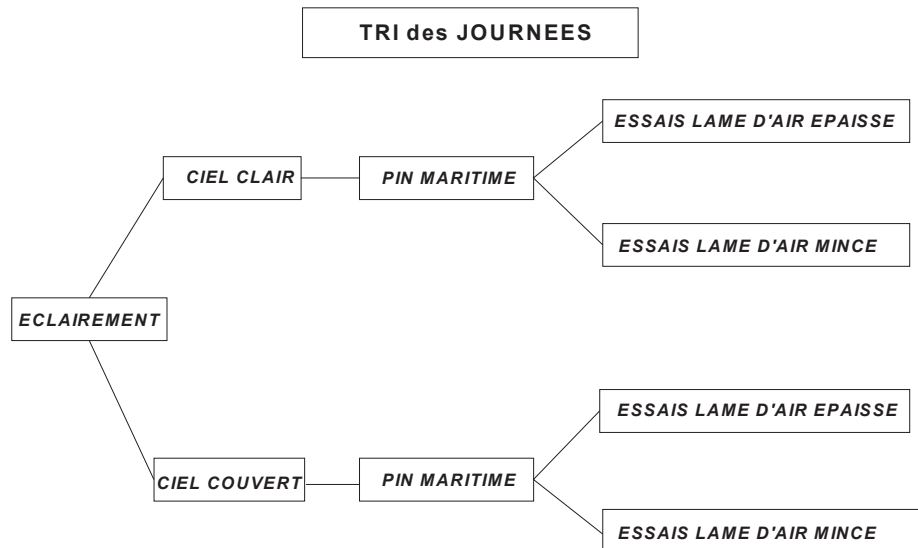


Figure 2.11 : Schéma de la classification des journées à Levignacq (Séquence A)

Les conditions météorologiques des essais de cette séquence sont illustrées ci-après. Le rayonnement solaire global y est indiqué.

Epaisseur de la lame d'air $e = 27 \text{ mm}$									
Journées	Etat du ciel	Description	Eclairement (W/m^2)			Température ambiante ($^{\circ}C$)			Vitesse maximale de l'air ambiant (m/s)
			Maximal	Minimal	Moyen	Maximale	Minimale	Moyenne	
17/09		Soleil le matin, mitigé l'après-midi	634	53	324	30	13	25	5
27/09		Soleil le matin, après-midi éclaircies entrecoupées de pluies fines	630	45	379	30	15	27	8
28/09		Soleil le matin, mitigé l'après-midi	620	49	442	30	15	26	6
29/09		Soleil le matin et l'après-midi avec des nuages épars	634	45	399	29	16	23	7

Epaisseur de la lame d'air e = 27 mm									
Journées	Etat du ciel	Description	Eclairement (W/m^2)			Température ambiante (°C)			Vitesse maximale de l'air ambiant (m/s)
			Maximal	Minimal	Moyen	Maximale	Minimale	Moyenne	
01/10		Mitigé le matin et nuageux l'après-midi	618	42	390	26	14	21	6
02/10		Pluies entrecoupées d'éclaircies à mi-journée	620	39	334	26	12	22	7
03/10		Mitigé le matin et nuageux l'après-midi	660	34	373	24	12	21	5
04/10		Soleil le matin et l'après-midi avec des nuages épars	643	42	235	27	15	21	6
05/10		Pluie modérée et soleil intermittent	633	20	266	26	15	22	5
06/10		Journée ensoleillée	692	22	387	23	18	20	6
09/10		Ciel totalement couvert (12ème jour)	193	16	81	23	16	18	8
10/10		Ciel couvert avec quelques éclaircies à la mi-journée	634	35	230	24	18	24	7
11/10		Ciel couvert avec petites pointes ensoleillées	237	18	91	22	17	21	6
12/10		Journée ensoleillée avec nuages épars en haute altitude	633	26	381	24	17	21	5
13/10		Ciel clair avec des nuages épars le matin, couvert à partir de 15 heures CEST	580	34	361	23	16	19	8
14/10		Ciel clair le matin, couvert à partir de 15 heures CEST	610	42	363	24	16	20	6
15/10		Ciel clair le matin, couvert à partir de 15 heures 36 CEST	615	28	387	23	11	20	6

Tableau 2.9 : Conditions météorologiques pour le tri des journées de la séquence de Levignacq (la journée du 07/10 est consacrée au changement d'épaisseur)

2.6.2 Séquence estivale du site ENSAM (Séquence B)

Les mesures ont été effectuées sur le double dispositif de bardage thermique fixé sur un mur en béton qui est présenté au paragraphe 2.3. Les deux lames d'air ont été couvertes par des plaques de parement, l'une en pin maritime avec surface intérieure peinte en blanc et l'autre en dérivé (aggloméré) de pin maritime en couleur propre. Les deux lames d'air

ont été formées du côté mural par les plaques de plâtre. Deux épaisseurs de lame d'air ont été testées en configuration unique de lame d'air ouverte. La classification a été faite selon le schéma décrit ci-contre.

La classification des essais de cette séquence est illustrée ci-après.

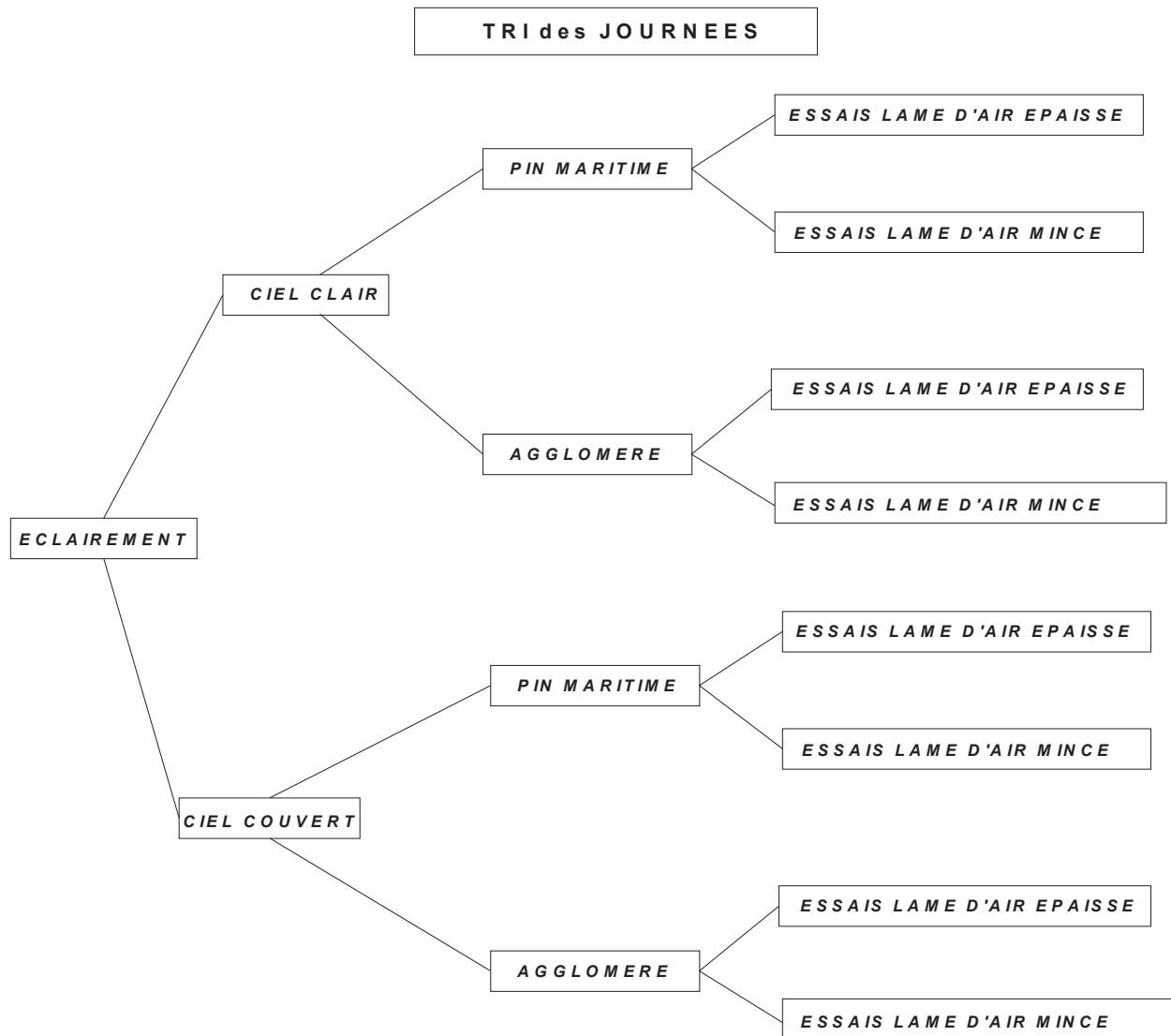


Figure 2.11 : Schéma de la classification des journées de séquence estivale du site ENSAM – Talence

Epaisseur de la lame d'air e = 27 mm									
Journées	Etat du ciel	Description	Eclairement (W/m^2)			Température ambiante (°C)			Vitesse maximale de l'air ambiant (m/s)
			Maximal	Minimal	Moyen	Maximale	Minimale	Moyenne	
16/07		Journée humide avec pluies intermittentes	601	38	260	31	24	27	9
17/07		Journée humide ciel couvert quelques éclaircies	89	41	171	28	21	24	8
18/07		Journée ensoleillée	581	53	352	32	19	26	6
19/07		Journée ensoleillée le matin, mitigée l'après-midi	615	63	366	36	23	31	8
20/07		Journée ensoleillée	689	73	378	37	22	29	7
21/07		Journée humide, ciel totalement couvert	254	0	51	21	16	19	9
22/07		Journée humide, ciel couvert dégagé par intermittences	538	59	169	27	19	23	7
23/07		Journée humide, ciel couvert dégagé par intermittences	537	29	244	27	18	22	7
24/07		Journée ensoleillée, nuages en altitude	581	63	314	30	19	25	8
25/07		Ciel totalement couvert	182	32	110	25	18	21	7
26/07		Journée ensoleillée, nuages en altitude	647	56	369	32	19	27	5
27/07		Journée ensoleillée, nuages et pluies intermittents	479	41	271	32	19	27	7
28/07		Matinée ensoleillée, nuages à partir de midi	445	90	308	33	23	29	8
29/07		Ciel très couvert matin, quelques éclaircies après midi	582	38	146	29	20	24	9
30/07		Journée ensoleillée entrecoupée de pluies	585	38	327	32	20	26	8

Epaisseur de la lame d'air $e = 60\text{ mm}$									
Journées	Etat du ciel	Description	Eclairement (W/m^2)			Température ambiante ($^{\circ}C$)			Vitesse maximale de l'air ambiant (m/s)
			Maximal	Minimal	Moyen	Maximale	Minimale	Moyenne	
01/08		Journée humide, pluie	257	0	62	23	19	21	8
02/08		Journée ensoleillée, pluies intermittentes	554	16	234	29	18	24	7
03/08		Journée ensoleillée nuages épars puis ciel couvert	510	25	252	30	20	25	9
04/08		Ciel couvert avec des éclaircies	410	13	167	25	17	22	8
05/08		Journée ensoleillée, nuages épars	614	52	451	28	18	23	6 ²
06/08		Journée ensoleillée, nuages épars	632	62	412	31	21	26	7
07/08		Ciel clair et ensoleillé	621	50	370	34	21	29	5
08/08		Journée humide, pluie	298	0	84	29	16	22	9
09/08		Journée humide, pluie	252	0	77	25	16	20	9

Tableau. 2.10 : Conditions météorologiques pour le tri des journées de la séquence estivale du site ENSAM (la journée du 31/07 est consacrée au changement d'épaisseur)

2.6.3 Séquence hivernale du site ENSAM (Séquence C)

Les mesures ont été effectuées sur le même dispositif qu'en séquence estivale. La configuration de la lame d'air fermée a été ajoutée pour tester la capacité du dispositif à emmagasiner de la chaleur en hiver.

La classification a été faite selon le schéma décrit ci-après :

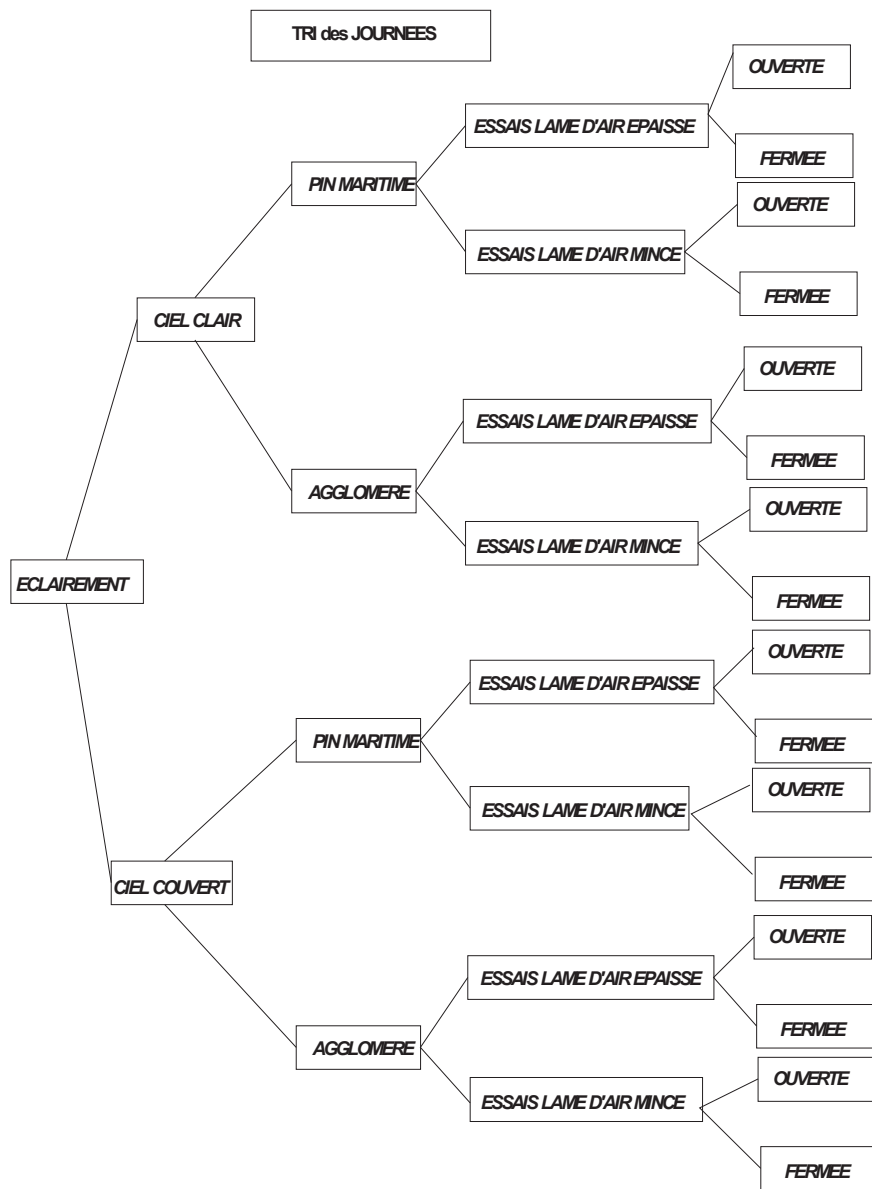


Figure 2.11 : Schéma de la classification des journées de séquence hivernale du site ENSAM – Talence

La classification des essais de cette séquence est illustrée ci - après :

Epaisseur de la lame d'air $e = 60 \text{ mm}$									
lame d'air ouverte									
Journées	Etat du ciel	Description	Eclairement (W/m^2)			Température ambiante ($^{\circ}\text{C}$)			Vitesse maximale de l'air ambiant (m/s)
			Maximal	Minimal	Moyen	Maximale	Minimale	Moyenne	
29/03		Journée nuageuse, soleil intermittent	662	10	170	17	7	10	8
30/03		Journée nuageuse, soleil intermittent	506	16	125	17	11	13	8
31/03		Journée nuageuse, soleil intermittent	457	31	1117	27	13	20	6

Epaisseur de la lame d'air e = 27 mm									
lame d'air ouverte									
Journées	Etat du ciel	Description	Eclairement (W/m^2)			Température ambiante (°C)			Vitesse maximale de l'air ambiant (m/s)
			Maximal	Minimal	Moyen	Maximale	Minimale	Moyenne	
15/03		Journée nuageuse	426	28	149	18	16	17	8
16/03		Journée nuageuse	459	8	120	19	11	16	8
17/03		Journée nuageuse	211	0	58	12	6	10	6
18/03		Journée nuageuse	431	0	39	17	4	10	7
19/03		Journée nuageuse	380	9	37	19	5	13	8
20/03		Ciel clair et ensoleillé	671	20	442	17	9	14	6
21/03		Ciel clair et ensoleillé	662	49	432	21	11	18	5
22/03		Ciel clair et ensoleillé	642	63	429	21	9	16	4
23/03		Ciel clair et ensoleillé	629	27	415	22	12	19	6
01/04		Ciel clair et ensoleillé	672	28	316	25	9	19	8
02/04		Journée avec temps variable	488	32	310	26	13	22	6
03/04		Journée couverte sans soleil	601	0	75	16	6	12	7
04/04		Pluies intermittentes	614	0	240	24	9	14	9
05/04		Journée ensoleillée, quelques nuages	560	0	429	23	8	17	8
06/04		Ciel clair et ensoleillé	669	4	431	33	9	23	6
07/04		Ciel clair et ensoleillé	630	16	418	30	12	25	5
08/04		Ciel clair et ensoleillé	640	35	425	30	15	26	5

Epaisseur de la lame d'air e = 27 mm									
lame d'air fermée									
Journées	Etat du ciel	Description	Eclairement (W/m^2)			Température ambiante ($^{\circ}C$)			Vitesse maximale de l'air ambiant (m/s)
			Maximal	Minimal	Moyen	Maximale	Minimale	Moyenne	
24/03		Ciel clair et ensoleillé	625	35	409	23	9	18	6
25/03		Ciel clair et ensoleillé	620	41	411	24	8	20	7
26/03		Journée nuageuse sans soleil	380	16	260	21	9	17	8
27/03		Journée nuageuse sans soleil	360	29	255	20	11	13	8
09/04		Ciel clair et ensoleillé	653	40	450	33	17	27	4
10/04		Journée nuageuse sans soleil	502	22	90	18	13	15	7
11/04		Journée nuageuse sans soleil	235	10	60	18	15	16	7
12/04		Matinée couverte, après midi ensoleillé	560	74	360	22	13	15	5
13/04		Ciel clair et ensoleillé	640	100	410	26	10	17	4

Tableau. 2.11 : Conditions météorologiques de la séquence hivernale du site ENSAM

2.7 Energie globale reçue par le dispositif de bardage

Les journées de ciel clair présentent un éclairement fort et les journées pluvieuses ou nuageuses présentent un éclairement solaire plutôt faible ou avec des variations brusques. Le rayonnement solaire intermittent ou furtif ne permet pas au bardage de parement de recevoir une irradiation globale suffisamment forte pour se chauffer et permettre de relever des mesures significatives pour déterminer correctement le comportement du système. Nous avons donc été conduits à étudier le climat solaire par l'intermédiaire de la durée d'insolation et de l'irradiation pendant différentes périodes de référence.

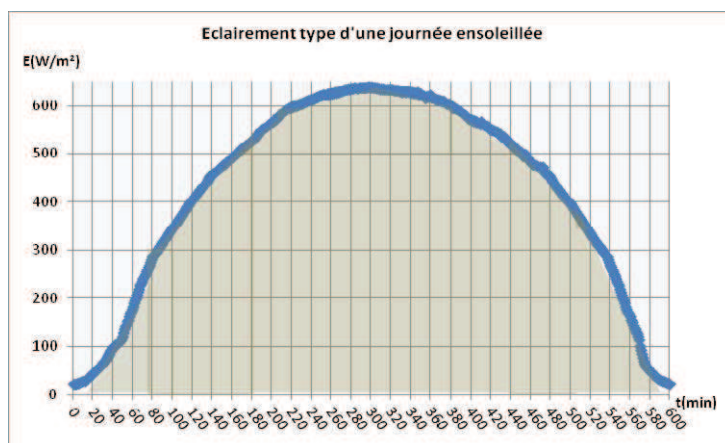


Figure 2.13. Irradiation type d'une journée ensoleillée

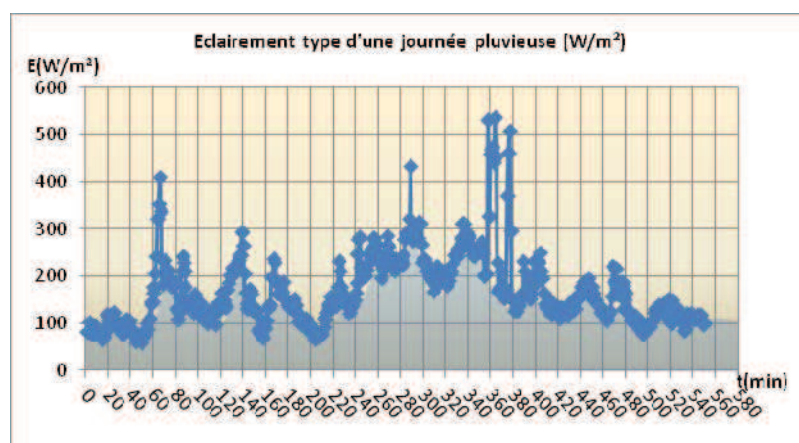


Figure 2.14. Eclairage d'une journée type

La densité de flux reçue par le bardage est représentée par la surface au dessous de la courbe expérimentale de l'éclairage. Les Figures 2.13 et 2.14 illustrent l'éclairage d'une journée dont l'état du ciel est respectivement clair ou pluvieux. Les journées considérées comme ensoleillées, sont des journées dont l'énergie globale reçue ou irradiation par le bardage est supérieure ou égale à la moyenne de l'énergie globale du jour et celles non classées dans cette catégorie sont considérées comme nuageuses. Par conséquent, les journées ensoleillées ont été retenues comme représentatives pour l'analyse des phénomènes physiques dans les dispositifs de bardage, toutefois, les journées nuageuses ont été analysées aussi pour l'étude comparative. L'irradiation est obtenue en faisant une intégration manuelle comme proposé par Bernard, [1987]. Les données sont indiquées dans le tableau 2.14.

Séquence A (Levignacq), essai estival							
Epaisseur de la lame d'air :							
e = 0,027 m				e = 0,060 m			
Journées	28/09	09/09	06/10	12/10	13/10	14/10	15/10
Energie Globale reçue (KWh/m ²)	3,23	3,27	3,44	3,15	3,05	2,99	2,92
Séquence B (site ENSAM), essai estival							
Epaisseur de la lame d'air :							
e = 0,027 m				e = 0,060 m			
Journées	18/07	19/07	20/07	26/07	5/08	6/08	
Energie Globale reçue (KWh/m ²)	3,54	3,67	3,75	3,42	3,25	3,15	
Séquence C (site ENSAM), essai hivernal							
Epaisseur de la lame d'air : 0,060 m							
ouverte				fermée			
Journées	20/03	21/03	22/03	23/03	24/03	25/03	
Energie Globale reçue (KWh/m ²)	2,4	2,1	1,98	2,3	2,4	2,5	
Séquence C (site ENSAM), essai hivernal							
Epaisseur de la lame d'air : 0,027 m							
ouverte				fermée			
Journées	01/04	06/04	07/04	08/04	09/04	13/04	
Energie Globale reçue (KWh/m ²)	2,4	2,2	2,1	2,3	2,1	2,3	

Tableau 2.14 : Récapitulatif des jours comparés et de leur éclairage

2.8 Démarche expérimentale globale

La démarche expérimentale globale suivie est illustrée sur la figure ci-dessous :

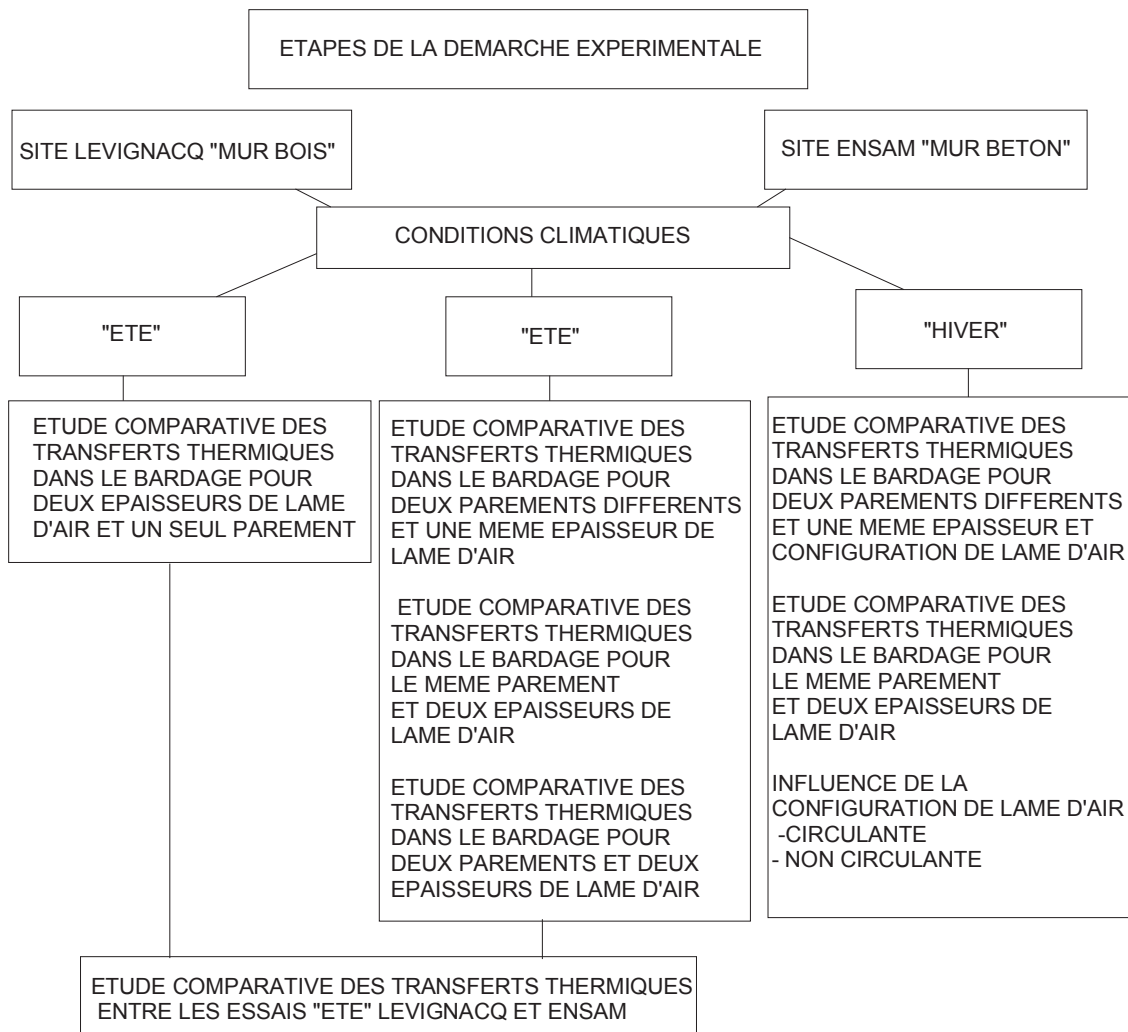


Fig. 2.15 : Synthèse des étapes de la démarche expérimentale

La mise en place des dispositifs expérimentaux décrits, va nous permettre de suivre le comportement de nos parois dans des conditions climatiques naturelles. L'analyse de ce comportement est l'étape suivante.

Chapitre 3 : RESULTATS, ANALYSE DU COMPORTEMENT THERMIQUE

L'étude expérimentale du bardage thermique a porté sur l'influence de certains paramètres opératoires et géométriques sur le débit de ventilation et l'énergie thermique évacuée par l'air ventilé. En fonction de l'éclairement solaire, du type de bardage, de la configuration de la lame d'air (ouverte ou fermée) et de l'épaisseur de la lame d'air, nous avons à déterminer les paramètres qui permettent de mieux comprendre le comportement du dispositif de bardage et ensuite de corrélérer les comportements aux paramètres discriminant du système.

Un protocole expérimental a été développé pour analyser le comportement thermique du mur bardé et évaluer l'importance de la lame d'air.

Le dispositif de bardage est un système passif dont les composantes sont utilisées pour réduire la quantité de chaleur entrant dans l'habitation dans les conditions estivales et stocker l'énergie thermique dans les conditions hivernales pour assurer un effet tampon entre l'extérieur et l'intérieur. L'approche expérimentale adoptée est d'évaluer graduellement les valeurs mesurées pour dégager le comportement de chaque configuration dans sa réponse globale ainsi que dans ses détails constructifs aux sollicitations extérieures.

3.1 Paramètres à mesurer pour comprendre les phénomènes physiques

La prédiction du transfert thermique et des phénomènes dans le dispositif de bardage a été réalisée en configurant son domaine physique. Les équations décrites dans le modèle physique, ont pour objectif de nous permettre de déduire de façon quantitative les phénomènes singuliers observés et ainsi, les résultats expérimentaux nous permettront de valider le modèle physique susmentionné.

Pour obtenir les résultats expérimentaux appropriés, les paramètres climatiques ont été observés et analysés expérimentalement. Notre choix s'est porté sur les paramètres suivants :

- Conditions météorologiques
 - L'éclairement solaire
 - La température ambiante.
 - La vitesse de l'air ambiant
- Données de l'air dans la lame d'air
 - La température dans les surfaces intérieure du bardage et extérieure du mur ;
 - La température ;
 - La vitesse de l'air.
- Données de l'intérieur de l'habitation
 - La température dans le mur isolant
 - La température de la zone habitable.

3.2 Evolution de l'éclairement et des températures

Afin de comprendre le comportement thermique des dispositifs de bardage, l'évolution de l'éclairement et des températures pendant plusieurs jours a été quantifiée. Les résultats des mesures montrent les variations des paramètres à partir de l'environnement ambiant jusqu'à l'intérieur de l'habitable. Les résultats obtenus pour la séquence A (site Levignacq) sont présentés sur la figure 3.1 pour le dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime, lame d'air mince et mur support à ossature bois.

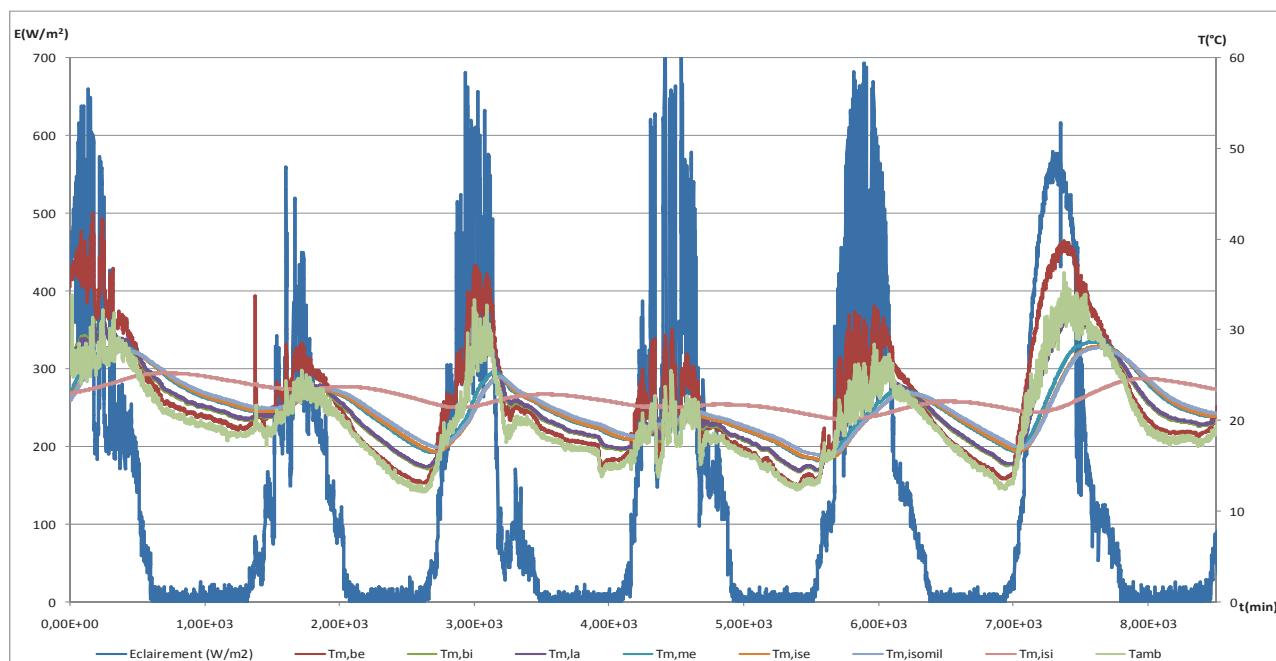


Figure 3.1 : Evolution de l'éclairement et des températures à hauteur médiane du dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime, lame d'air mince et mur support à ossature bois (Séquence A) sur plusieurs jours (du 29 septembre au 4 octobre 2009).

La figure 3.1 illustre l'évolution de l'éclairement (W/m^2) et des températures en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) à la hauteur médiane des surfaces extérieure ($T_{m,be}$) et intérieure ($T_{m,bi}$) de la plaque de parement, de l'air au milieu de la lame d'air ($T_{m,la}$), de la surface extérieure du mur support ($T_{m,me}$), de la surface extérieure ($T_{m,ise}$), au milieu ($T_{m,isolmil}$) et de la surface intérieure ($T_{m,isi}$) de l'isolant et la température de l'air ambiant (T_{amb}).

La diminution progressive des températures à travers les différentes couches qui composent le dispositif du bardage et le mur composite est constatée. La courbe $T_{m,isi}$ qui représente la température sur la surface intérieure de l'isolant, évolue avec une amplitude moins prononcée que les autres courbes. Ceci montre que la température à la surface intérieure du mur support est plus stable, ce qui permet de maintenir une température de l'habitable plus ou moins homogène et moins dépendante des fluctuations thermiques de l'extérieur.

Les résultats obtenus pour la séquence B (site ENSAM) sont présentés sur la figure 3.2 pour le dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime, lame d'air mince et mur support en béton et sur la figure 3.3 pour le dispositif de bardage en aggloméré, lame d'air mince et mur support en béton.

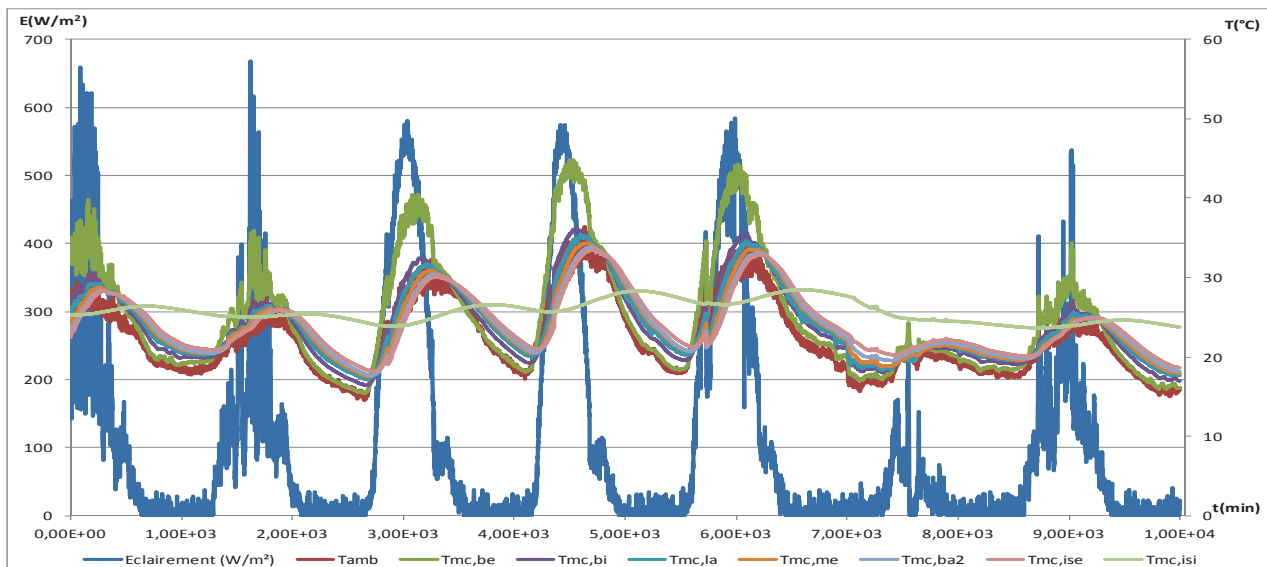


Figure 3.2 : Evolution de l'éclairement et des températures à mi-hauteur du dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime et lame d'air mince ouverte (séquence B) sur plusieurs jours (du 17 au 23 juillet 2010).

La figure 3.2 illustre l'évolution de l'éclairement (W/m^2) et des températures en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) de l'air ambiant (T_{amb}), à la hauteur médiane des surfaces extérieure ($T_{\text{mc,be}}$) et intérieure ($T_{\text{mc,bi}}$) de la plaque de parement, de l'air au milieu de la lame d'air ($T_{\text{mc,la}}$), de la surface extérieure du mur support ($T_{\text{mc,me}}$), entre les deux plaques de plâtre ($T_{\text{mc,ba2}}$), de la surface extérieure ($T_{\text{mc,ise}}$) et de la surface intérieure ($T_{\text{mc,isi}}$) de l'isolant.

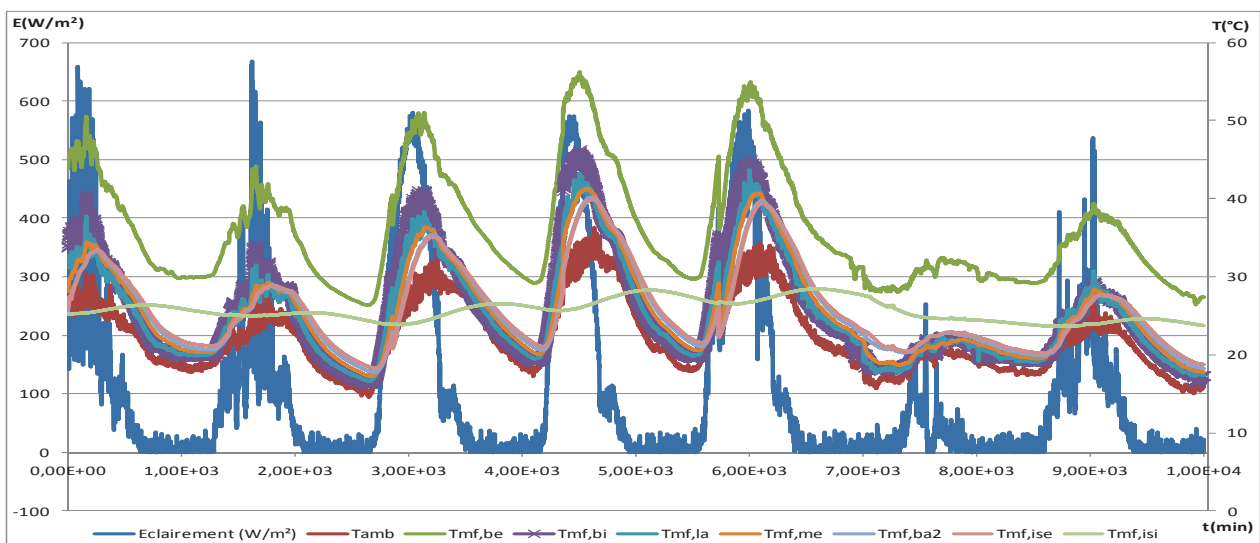


Figure 3.3 : Evolution de l'éclairement et des températures à mi-hauteur du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré et lame d'air mince ouverte (séquence B) sur plusieurs jours (du 17 au 23 juillet 2010)

La figure 3.3 illustre l'évolution de l'éclairement (W/m^2) et des températures en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) de l'air ambiant (T_{amb}), à la hauteur médiane des surfaces extérieure ($T_{\text{mf,be}}$) et intérieure ($T_{\text{mf,bi}}$) de la plaque de parement, au milieu de la lame d'air ($T_{\text{mf,la}}$), de la surface extérieure du mur support ($T_{\text{mf,me}}$), entre les deux plaques de plâtre ($T_{\text{mf,ba2}}$), de la surface extérieure ($T_{\text{m,ise}}$) et de la surface intérieure ($T_{\text{m,isi}}$) de l'isolant.

L'analyse faite sur les figures 3.2 et 3.3 nous permet de constater une diminution progressive des températures à travers les différentes couches qui composent les dispositifs de bardage et le mur composite, néanmoins la température de la surface extérieure de la plaque de parement en aggloméré atteint des valeurs plus élevées que celles de la température de la surface extérieure de la plaque de parement en pin maritime. La courbe $T_{\text{m,isi}}$ qui représente la température sur la surface intérieure de l'isolant, évolue avec une amplitude moins prononcée que les autres courbes. Ceci montre que la température à la surface intérieure du mur support pour les deux dispositifs de bardage est plus stable, ce qui permet de maintenir une température de l'habitable plus ou moins constante et moins dépendante des fluctuations thermiques de l'extérieur.

3.3 Présentation d'un résultat type de journée ensoleillée

Considérant que l'éclairement solaire et la température ambiante sont les paramètres de référence pour l'analyse des phénomènes thermophysiques dans le dispositif de bardage, le comportement des dispositifs de bardage a été analysé essentiellement en fonction de ces deux paramètres. Les journées ont été classées en ensoleillées (ciel clair avec ou sans quelques nuages) et nuageuses (ciel couvert avec ou sans pluies). Considérant l'atténuation par les nuages du rayonnement solaire global, les journées ensoleillées sans nuages ont été retenues comme représentatives pour une telle analyse, (voir chapitre 2, (Tableaux 2.9 – 2.11)).

Les résultats bruts d'une journée type de ciel clair sont représentés sur la Figure 3.4 ci-contre, à savoir, l'évolution de l'éclairement solaire (E), de la vitesse de l'air ambiant ($v_{\text{a,amb}}$) et de la température ambiante (T_{amb}).

Les valeurs sont normalisées sur la maximale des données climatiques de la journée ensoleillée type.

L'éclairement solaire maximal est de 689 W/m^2 et la température ambiante maximale de 37°C .

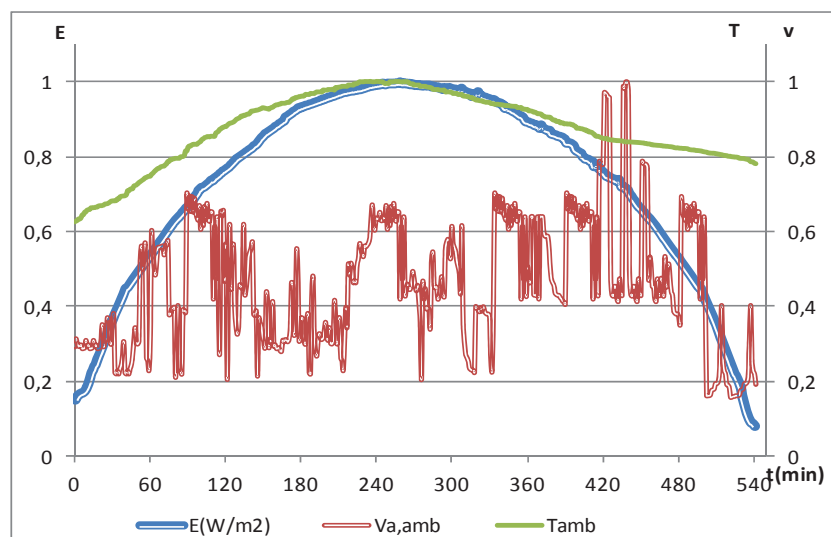
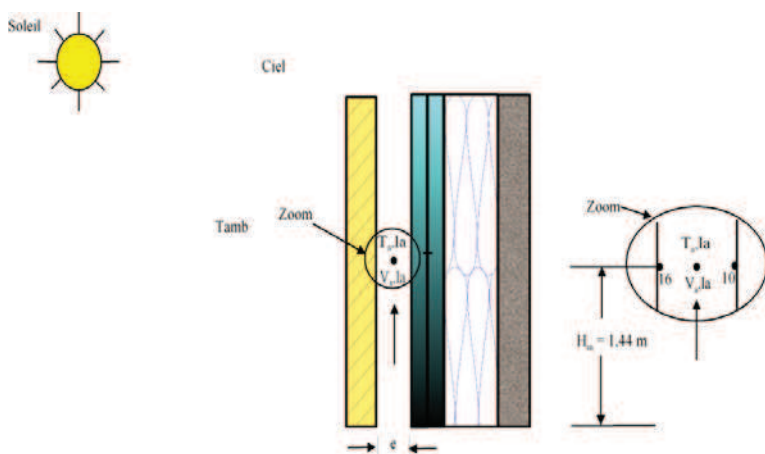


Figure 3.4 : Valeurs normalisées des conditions météorologiques d'une journée type ensoleillée (20/07/10) (séquence B)

3.3.1 Analyse des écoulements entre plaques du dispositif de bardage

La façade étant soumise à un rayonnement incident direct, la surface extérieure de la plaque de parement en pin maritime reçoit le rayonnement incident solaire et ceci génère des transferts thermiques dans le dispositif de bardage. Le comportement des écoulements est analysé en hauteur médiane de la lame d'air (Figure 3.5).



Le zoom de la Figure 3.5 illustre la zone de la lame d'air en hauteur médiane ($H_m = 1,44\text{m}$) analysée dans cette étude et les thermocouples 16 et 10 symbolisent les températures de la surface intérieure de la plaque de parement $T_{m,bi}$ et de la surface extérieure du support mural $T_{m,me}$ (voir chapitre 2, Figures 2.5 et 2.6).

Figure 3.5 : Illustration de la hauteur de l'analyse des mesures dans la lame d'air

Les valeurs de la température des surfaces des plaques, et de la vitesse de l'air sont rapportée Figure 3.6 ci-dessous.

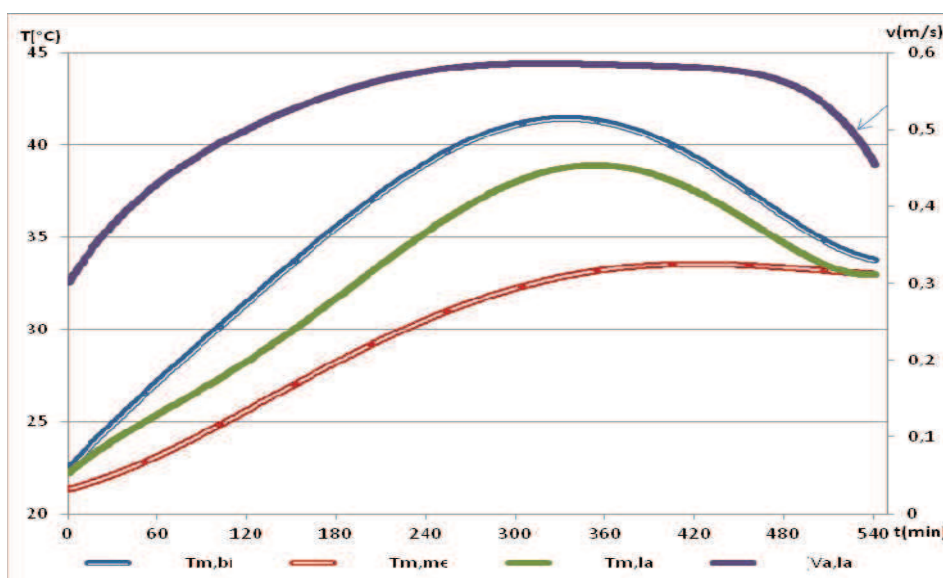


Figure 3.6 : Evolution des températures des surfaces des plaques formant le canal entre plaques et de la vitesse de l'air (20/07/10) (séquence B)

Les courbes $T_{m,bi}$, $T_{m,me}$ et $T_{m,la}$ représentent respectivement les températures des surfaces interne de la plaque de parement, extérieure du mur isolant et de la lame d'air. Ces données montrent la diminution des températures entre la surface interne de la plaque de parement $T_{m,bi}$ et l'extérieur du mur isolant $T_{m,me}$, la chaleur étant évacuée par la lame d'air. La vitesse d'écoulement de l'air est symbolisée par la courbe $v_{a,la}$.

Nous constatons que dans cette lame d'air, la vitesse de l'air se développe au cours du temps. La température de l'air est liée aux températures pariétales et elle est la moyenne pondérée par la corrélation (4.15) des températures des plaques, pondération mettant en avant la température de la surface interne de la plaque de parement puisque celle-ci est plus chaude, et ceci démontre l'importance des températures des plaques.

3.3.2 Analyse des températures de l'air le long du canal

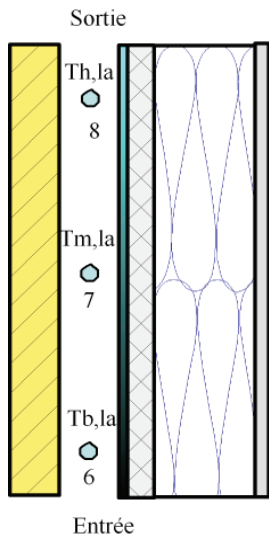


Figure 3.7 : Emplacement des thermocouples le long du canal.

Pendant une journée ensoleillée, la surface extérieure de la plaque de parement reçoit un rayonnement solaire qui génère des échanges convectifs et radiatifs dans la lame d'air. L'évolution des températures entre l'entrée et la sortie de la lame d'air permet de visualiser ces échanges thermiques le long du canal.

Les températures mesurées par les thermocouples 6 (entrée), 7 (hauteur médiane) et 8 (sortie) illustrés sur la figure 3.7 permettent de mener cette analyse.

Les valeurs des températures de l'air mesurées tout au long du canal pendant une journée ensoleillée estivale sont reportées sur la Figure 3.8. Les températures de l'air à l'entrée, à la hauteur médiane et à la sortie sont représentées par les courbes $T_{b,la}$, $T_{m,la}$ et $T_{h,la}$ respectivement.

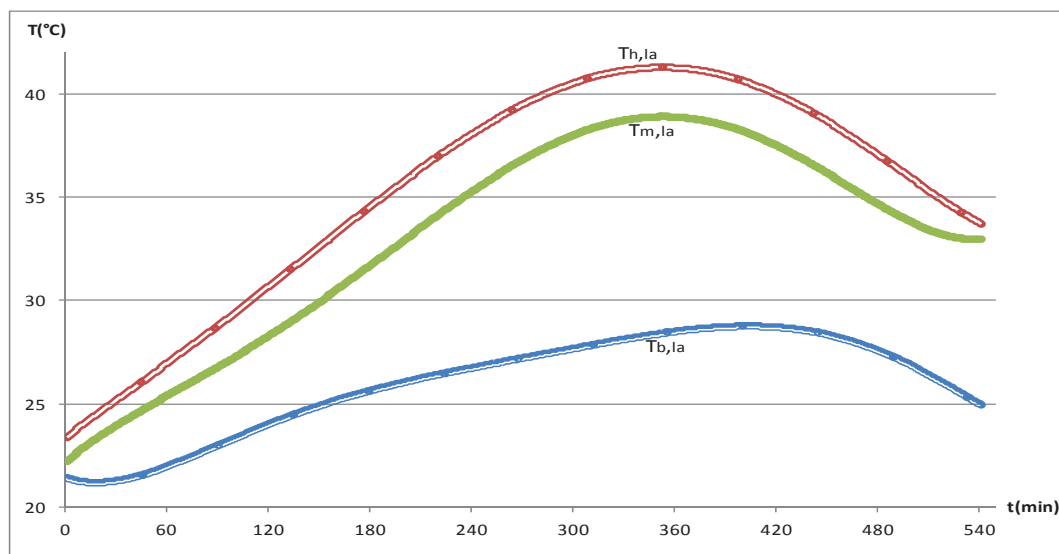
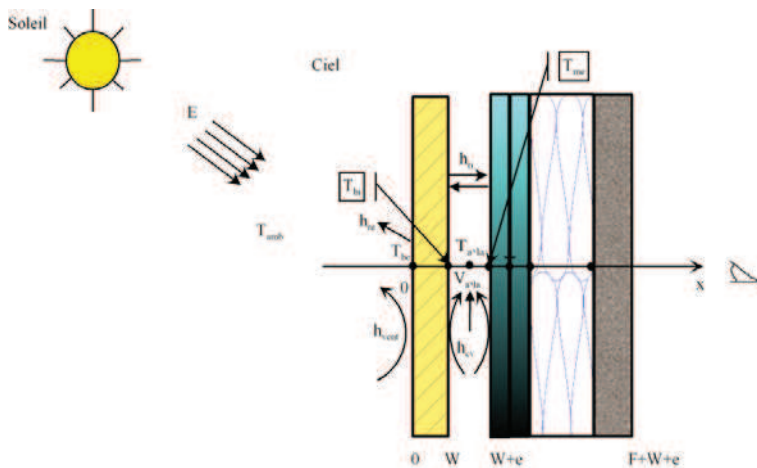


Figure 3.8 : Evolution temporelle des températures de l'air dans le canal entre plaques pendant une journée ensoleillée estivale (20/07/10)

A l'entrée du canal, la température mesurée de l'air $T_{b,la}$ entre parois est très proche de la température ambiante. Sous l'effet des transferts thermiques, cette température augmente et amorce un mouvement ascendant et elle atteint des valeurs plus élevées entre la hauteur médiane $T_{m,la}$ et la sortie du canal $T_{h,la}$.

3.3.3 Analyse des températures du dispositif de bardage en hauteur médiane



L'analyse de mesures effectuées à partir de la surface extérieure de la plaque de parement à la surface intérieure du mur isolant sont illustrées sur la Figure 3.9 et ceci suivant les thermocouples de la hauteur médiane (voir chapitre 2, Figure 2.6).

Figure 3.9 : Illustration des mesures analysées en hauteur médiane du dispositif de bardage

Les valeurs des mesures des températures indiquées ci-dessus sont illustrées sur la Figure 3.10.

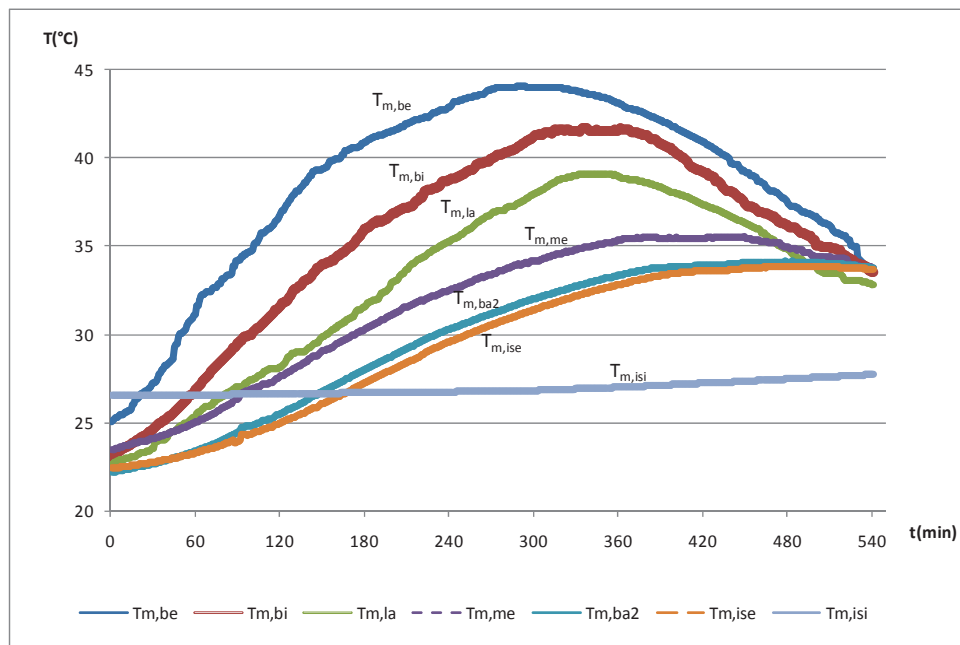


Figure 3.10 : Evolution des températures en hauteur médiane du dispositif de bardage (20/07/10)

La Figure 3.10 représente la situation typique de l'isolation extérieure par un bardage puisque la courbe $T_{m,be}$ qui symbolise la température de la surface extérieure de la plaque de parement qui reçoit le rayonnement solaire incident est la plus élevée, suivie de la courbe $T_{m,bi}$ qui est la température de la surface intérieure de la même plaque. Nous observons un décalage entre les valeurs maximales des courbes $T_{m,be}$ et $T_{m,bi}$ et ceci est dû à l'inertie de la plaque de parement. La courbe $T_{m,la}$ qui représente la température de l'air chaud entre plaques évacue la chaleur sous l'effet de la flottabilité.

On constate qu'à partir de la courbe $T_{m,me}$ qui montre la température de la surface extérieure du mur isolant, les températures diminuent pour atteindre une évolution presque constante sur la surface intérieure de l'isolant représentée par la courbe $T_{m,isi}$.

3.4 Présentation d'un résultat type de journée nuageuse

Les mesures présentées ici (Figure 3.11), sont celles d'une journée automnale (11/10/09) avec une vitesse de l'air ambiant de force modérée (6 m/s) et direction variable et, l'absence de fort rayonnement solaire direct et ceci conforme aux conditions climatiques de cette période, (voir chapitre 2, (Tableaux 2.9 – 2.11)).

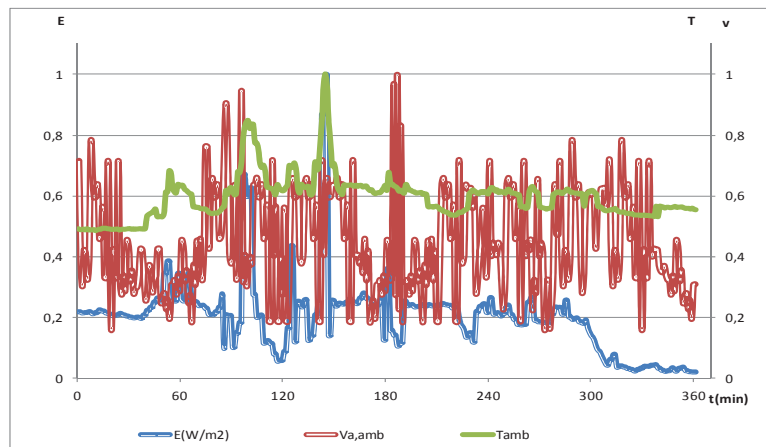


Figure 3.11 : Valeurs normalisées des conditions climatiques d'une journée nuageuse automnale type

La température ambiante évolue avec des oscillations sans réel accroissement tout au long de la journée et l'on constate que la vitesse de l'air ambiant est plus irrégulière que celle d'une journée ensoleillée.

La Figure 3.11 présente les valeurs normalisées sur la maximale des données climatiques de la journée nuageuse type. L'éclairement solaire maximal est de 237 W/m^2 mais cette valeur est ponctuelle et la température ambiante maximale de 22°C toutefois, elle a des valeurs inférieures la plupart du temps et ces valeurs restent presque stables tout au long de la journée.

3.4.1 Analyse des écoulements dans la lame d'air en hauteur médiane

L'énergie solaire absorbée par la plaque de parement permet d'avoir des écoulements au sein du canal entre plaques du dispositif de bardage en hauteur médiane (voir Figure 3.5), dont l'analyse se présente comme suit (Figure 3.12):

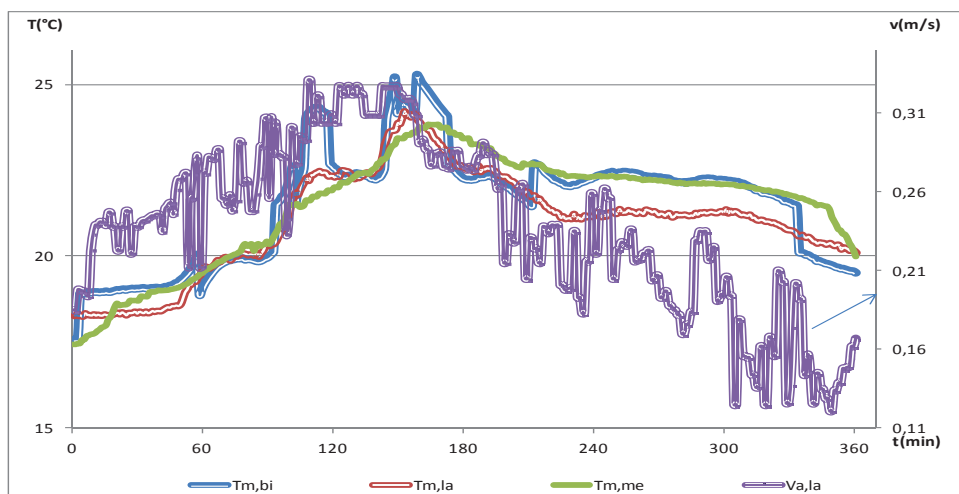


Figure 3.12 : Evolution des températures des surfaces pariétales et des écoulements dans la lame d'air en hauteur médiane du canal (11/10/09)

Les courbes $T_{m,bi}$, $T_{m,la}$ et $T_{m,me}$ représentent respectivement les températures de la surface interne de la plaque de parement, de l'air dans le canal et de la surface extérieure du mur isolant. Ces données montrent qu'en présence de faible rayonnement direct incident, les valeurs des températures pariétales ont des écarts très faibles et à certains moments, la surface extérieure du mur a des valeurs plus élevées que celle de la plaque de parement.

La vitesse de l'air dans le canal $v_{a,la}$ qui reste faible, n'évolue pas uniquement sous l'influence du faible écart entre températures des surfaces pariétales mais aussi sous l'écart des températures entre la lame d'air et l'environnement ambiant.

3.4.2 Analyse des températures de l'air le long du canal entre plaques

Les valeurs des températures de l'air mesurées tout au long du canal pendant une journée couverte automnale sont reportées sur la Figure 3.13. Les températures de l'air à l'entrée, à la hauteur médiane et à la sortie sont représentées par les courbes $T_{b,la}$, $T_{m,la}$ et $T_{h,la}$ respectivement.

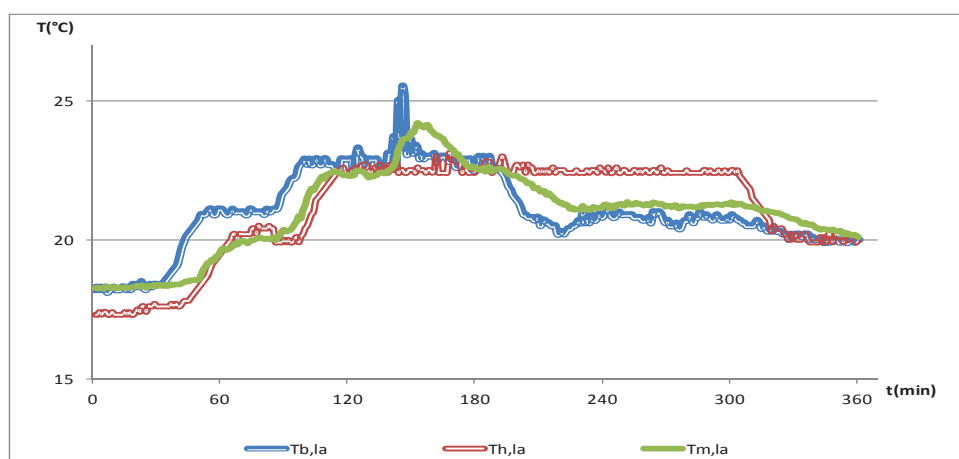


Figure 3.13 : Evolution temporelle des températures de l'air dans le canal entre plaques pendant une journée nuageuse automnale (11/10/09)

Les courbes des températures de l'air mesurées à l'entrée $T_{b,la}$, en hauteur médiane $T_{m,la}$ et à la sortie $T_{h,la}$, présentent des faibles écarts entre elles. Ces données montrent qu'en présence de faible rayonnement direct incident, la convection et le rayonnement entre plaques sont très faibles pour générer des températures élevées dans le canal entre plaques cependant, le gradient de températures le long du canal génère des faibles vitesses de l'air qui permettent le fonctionnement du dispositif de bardage.

3.4.3 Analyse des températures du dispositif de bardage en hauteur médiane

Suivant la figure 3.9, les mesures des températures effectuées pendant la journée nuageuse sur le dispositif de bardage en hauteur médiane sont illustrées sur la figure 3.14.

Comme cette journée est marquée par un rayonnement solaire incident faible, la température de la surface extérieure de la plaque de parement $T_{m,be}$ varie en fonction de l'éclairement solaire. Entre la température de la surface intérieure de la plaque de parement $T_{m,bi}$ et celle de la surface intérieure de l'isolant $T_{m,isi}$, l'écart est très limité.

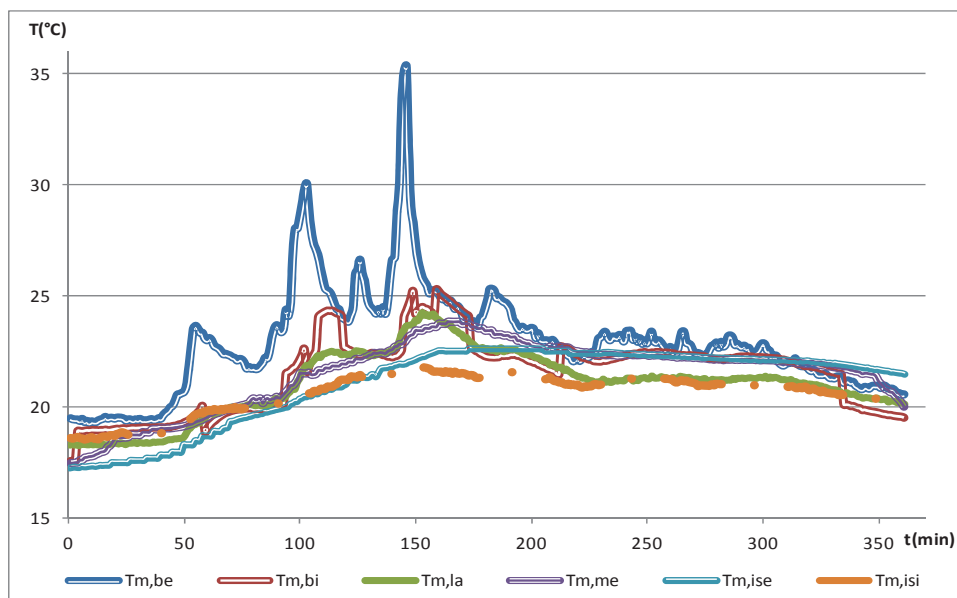


Figure 3.14 : Evolution des températures en hauteur médiane du dispositif de bardage de la journée couverte du (11/04/09)

3.5 Etude comparative des écoulements entre plaques

3.5.1 Transferts thermiques dans les lames d'air de différentes épaisseurs

En se situant sur la hauteur médiane dans la lame d'air (figure 3.5), nous nous intéressons, pour les deux écartements de la lame d'air, aux écoulements pour ainsi dégager les comportements de ce dispositif avec chaque épaisseur de lame d'air.

Pour chaque typologie du mur support (ossature bois et béton), deux essais avec conditions d'ensoleillement comparables sont analysés.

Les résultats obtenus sur les deux supports sont illustrés sur les figures 3.15 et 3.16.

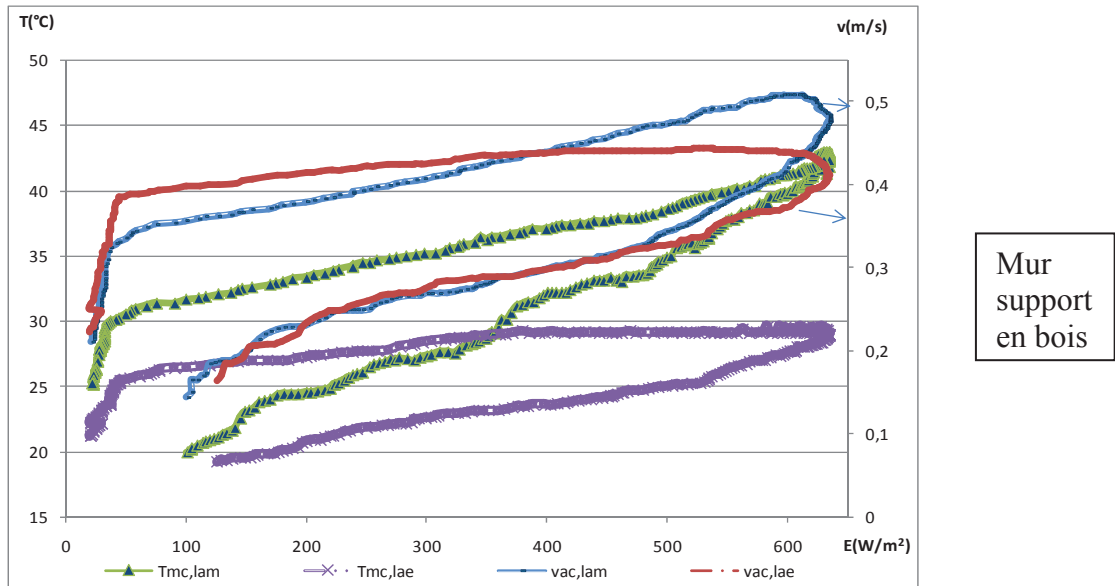


Figure 3.15 : Evolution des écoulements en hauteur médiane des lames d'air mince et épaisse avec plaque de parement en pin maritime de la séquence A (06/10/09) et (12/10/09) en fonction de l'éclairement solaire

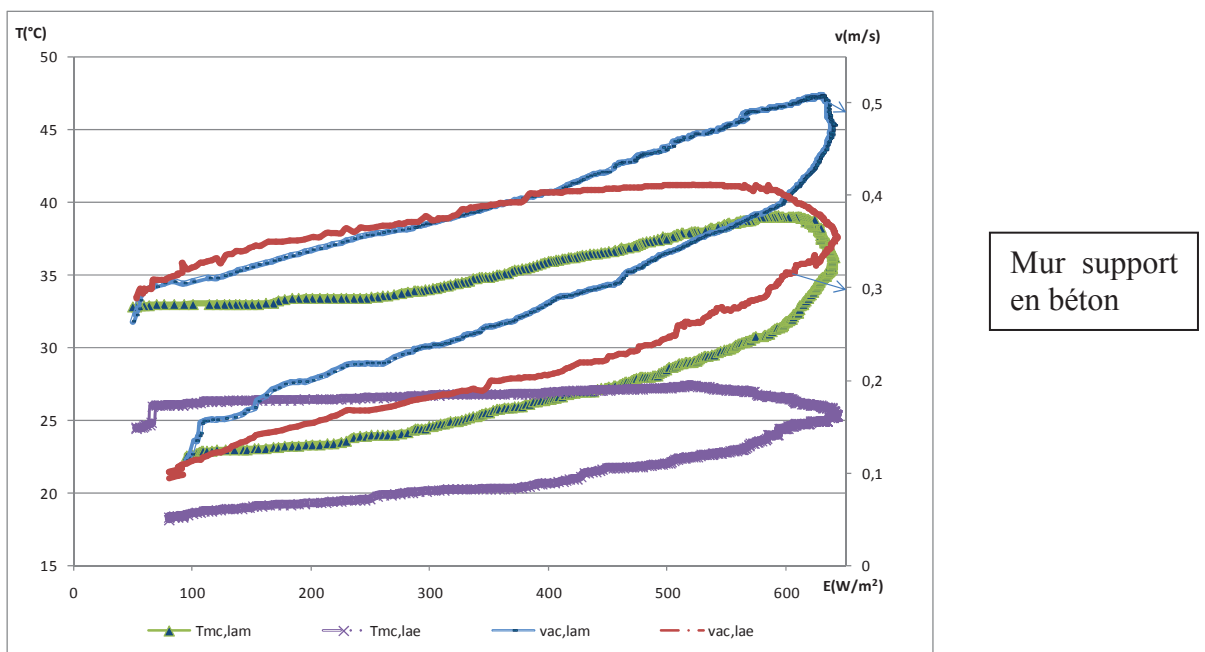


Figure 3.16 : Evolution des écoulements en hauteur médiane des lames d'air mince et épaisse avec plaque de parement en pin maritime pour deux journées estivales de la séquence B (20/07/10) et (05/08/10) en fonction de l'éclairement solaire.

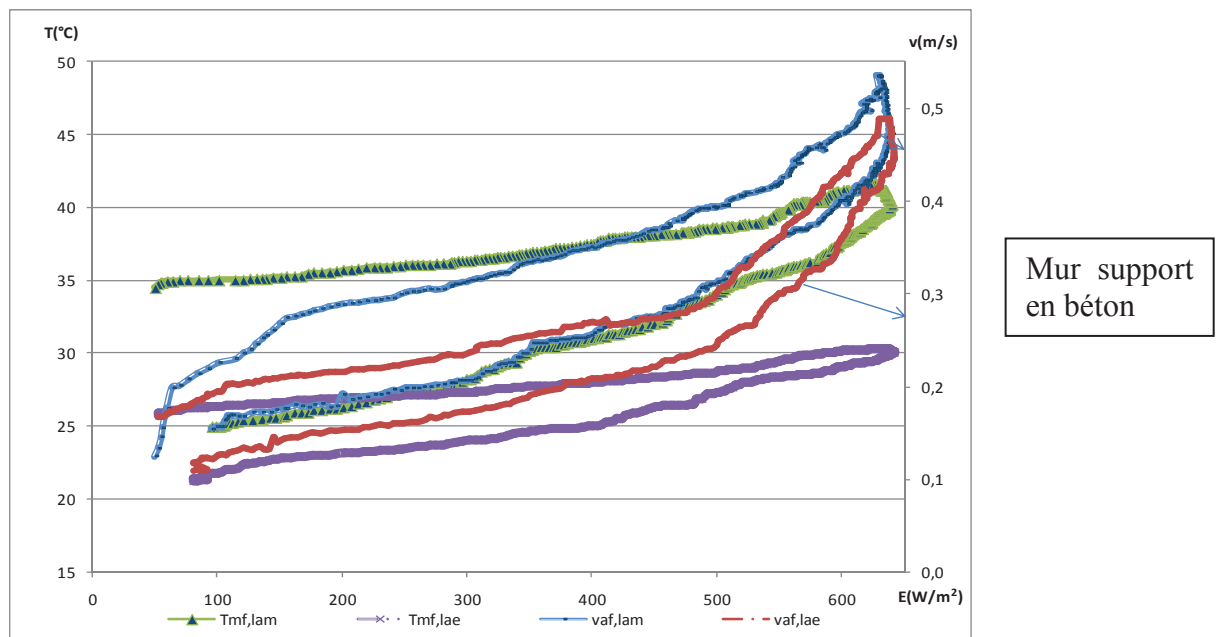


Figure 3.17 : Evolution des écoulements en hauteur médiane des lames d'air mince et épaisse avec plaque de parement en aggloméré pour deux journées estivales de la séquence B (20/07/10) et (05/08/10) en fonction de l'éclairement solaire.

Les courbes des figures 3.15 et 3.16 montrent l'évolution journalière des vitesses et températures en hauteur médiane des lames d'air mince et épaisse avec plaque de parement en pin maritime et celles de la figure 3.17 présentent les mêmes écoulements dans les dispositifs avec plaque de parement en aggloméré de pin. Les courbes $v_{ac,lam}$, $T_{mc,lam}$, $v_{af,lam}$ et $T_{mf,lam}$ qui symbolisent les écoulements dans les dispositifs avec lame d'air mince ont des valeurs plus élevées que celles de leurs courbes correspondantes dans les dispositifs avec la lame d'air épaisse. Ceci nous permet de constater qu'avec l'agrandissement de la lame d'air du dispositif, les températures et vitesses de l'air entre plaques diminuent très légèrement et ceci est dû à l'affaiblissement de l'intensité du rayonnement entre plaques donc, diminution de la convection dans la lame d'air, mais le débit massique de l'air évacué est supérieur.

Les mesures présentées ici font apparaître les différences entre les écoulements. Les vitesses de l'air dans le canal mince $v_{ac,lam}$ et $v_{af,lam}$ atteignent des valeurs maximales plus élevées que celles des vitesses de l'air $v_{ac,lae}$ et $v_{af,lae}$ dans le canal épais. L'écart entre la phase ascendante et la phase descendante de ces vitesses nous montre que les vitesses de l'air dans les dispositifs avec plaque de parement en pin maritime et canal épais, ont un écart plus élevé puisque la vitesse et la température de l'air se maintiennent dans leurs valeurs élevées pendant un temps plus long que dans les lames d'air minces donc, une accumulation d'énergie plus longue dans la durée. Les écoulements dans les dispositifs avec plaque de parement en aggloméré diminuent avec l'agrandissement de l'épaisseur de la lame d'air sans accumulation d'énergie.

3.5.2 Influence de la plaque de parement sur la vitesse et les transferts

L'étude comparative est effectuée en hauteur médiane (voir la figure 3.5) de deux dispositifs qui reçoivent le même rayonnement solaire incident. Chaque dispositif a une plaque

de parement qui diffère de celle de l'autre par son épaisseur, son facteur d'absorption du rayonnement solaire et sa nature. Les résultats des mesures de deux journées ensoleillées pour deux épaisseurs de lame d'air sont illustrées sur les figures 3.18 et 3.19.

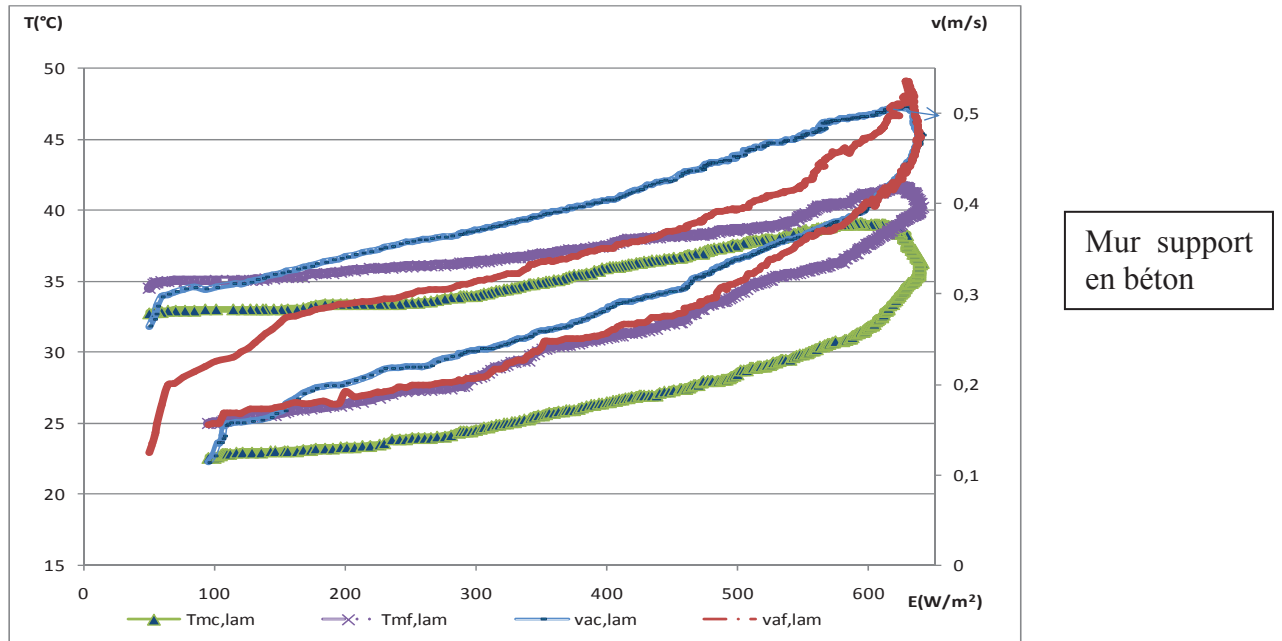


Figure 3.18 : Evolution des écoulements dans les lames d'air minces avec plaques de parement en pin maritime et en aggloméré de la journée estivale ensoleillée de la séquence B (20/07/10) en fonction de l'éclairement solaire.

La courbe $v_{af,lam}$ qui représente la vitesse de l'air dans le dispositif avec plaque de parement en aggloméré atteint des valeurs maximales supérieures à celle de la vitesse de l'air $v_{ac,lam}$ dans le canal avec plaque de parement en pin maritime. La température de l'air $T_{mf,lam}$ du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré est aussi supérieure à la température $T_{mc,lam}$ de la lame d'air avec plaque de parement en pin maritime.

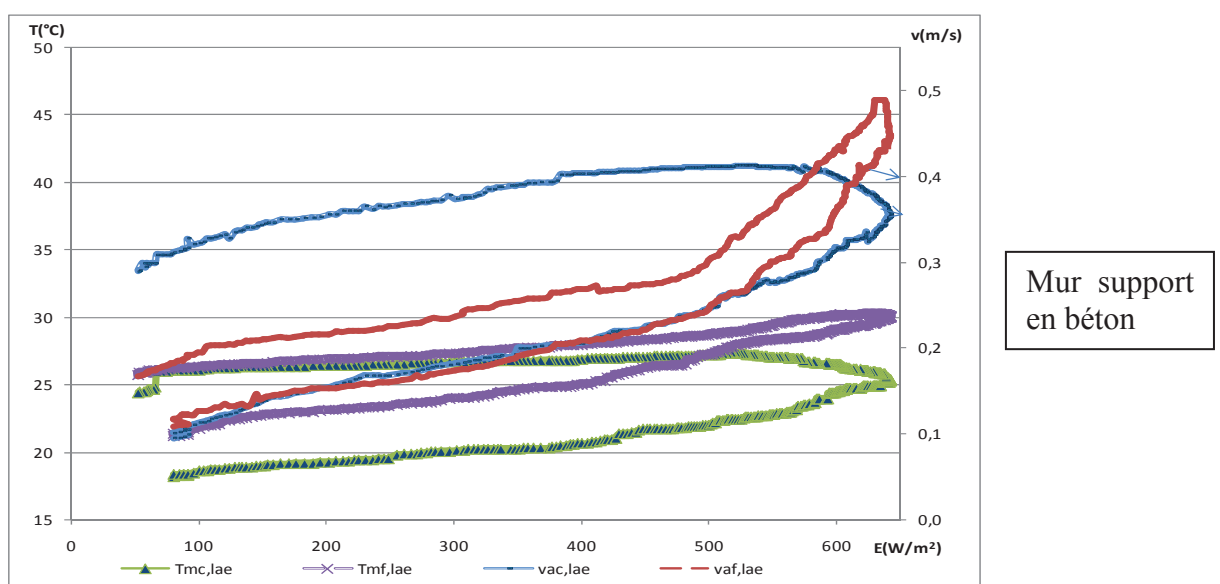


Figure 3.19 : Evolution des écoulements dans la lame d'air épaisse avec plaques de parement en pin maritime et en aggloméré pour une journée de la séquence B (05/08/10) en fonction de l'éclairement solaire.

Les mesures illustrées sur la figure 3.19 confirment les constatations de la figure 3.18. Les écoulements dans la lame d'air épaisse du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré atteignent des valeurs maximales supérieures à celles des écoulements dans la lame d'air avec plaque de parement en pin maritime.

L'analyse des courbes sur les deux précédentes figures nous permet de constater que les courbes des températures et vitesses dans les dispositifs avec plaque de parement en aggloméré atteignent des valeurs maximales supérieures à celles du dispositif avec plaque de parement en pin maritime mais elles sont plus minces, autrement dit, elles ont un moindre écart entre les phases croissantes et décroissantes. Ceci est dû au fait que la plaque en aggloméré a une épaisseur plus petite que celle de la plaque en pin maritime, une autre couleur et une conductivité thermique plus élevée donc, moins d'inertie, ce qui la rend plus sensible aux changements climatiques.

3.5.3 Comparaison des essais entre les deux sites géographiques

Pendant l'essai de Levignacq, les mesures ont été menées uniquement sur la plaque de parement en pin maritime, par conséquent, l'étude est menée ici sur les dispositifs de bardage avec cette plaque. L'analyse des mesures des écoulements dans la lame d'air en hauteur médiane nous permet de constater les différences entre les murs supports à ossature bois de Levignacq et en béton de l'ENSAM.

Les résultats obtenus pour deux dispositifs avec lame d'air mince sont illustrés sur la figure 3.20.

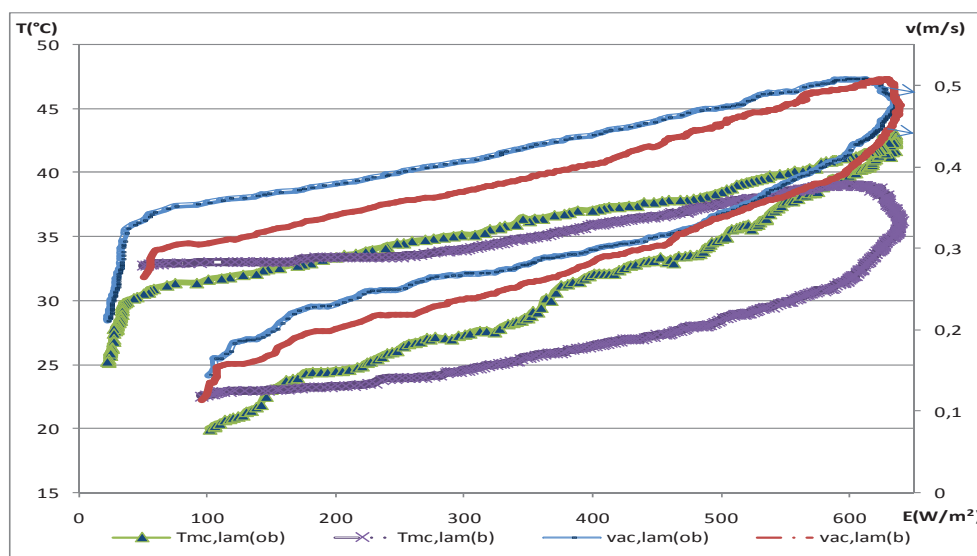


Figure : 3.20 Evolution des écoulements dans la lame d'air mince des bardages avec plaque de parement en pin maritime des séquences A (06/10/09) et B (20/07/10) en fonction de l'éclairement solaire

Les résultats obtenus pour deux dispositifs avec lame d'air épaisse sont illustrés sur la figure 3.21.

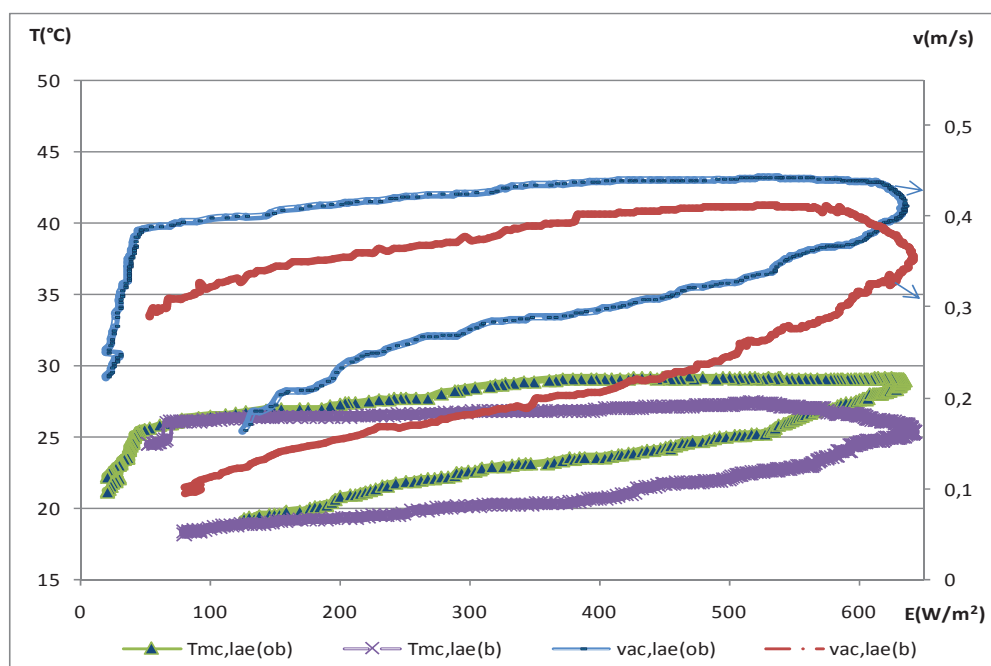


Figure : 3.21 Evolution des écoulements dans la lame d'air épaisse des bardages avec plaque de parement en pin maritime des séquences A (12/10/09) et B (05/08/10) en fonction de l'éclairement solaire

Les courbes des figures 3.20 et 3.21 montrent l'évolution journalière des vitesses et températures en hauteur médiane de la lame d'air avec la même épaisseur mais pour deux journées différentes. Une journée de l'essai de Levignacq et l'autre du site de l'ENSAM. Les courbes $T_{mc, lam(ob)}$ et $T_{mc, lae(ob)}$ qui symbolisent les températures de l'air dans le dispositif de Levignacq ont des valeurs plus élevées que celles des courbes correspondantes $T_{mc, lam(b)}$ et $T_{mc, lae(b)}$ du dispositif de l'ENSAM mais, les vitesses $v_{ac, lam(ob)}$ et $v_{ac, lae(ob)}$ de l'air du dispositif de Levignacq ont des valeurs inférieures aux vitesses de l'air $v_{ac, lam(b)}$ et $v_{ac, lae(b)}$ du dispositif de l'ENSAM. Ceci est dû au fait que le dispositif de Levignacq a de l'ombrage généré par le pare soleil et ceci forme une obstruction solaire verticale près de la sortie.

Considérant que les dispositifs de bardage ont la même plaque de parement en pin maritime mais deux supports muraux différents, les courbes ont la même allure mais globalement, les courbes de Levignacq sont moins larges que celles de l'ENSAM et ceci démontre l'influence du support mural. Le support mural sur le béton de l'ENSAM a plus d'inertie que le mur à ossature bois de Levignacq.

L'analyse du comportement des dispositifs de bardage avec supports muraux à ossature bois et en béton permet de constater que pour le dispositif mural à ossature bois, la plaque de parement en pin maritime avec lame d'air mince répond aux attentes de confort thermique. Ce même dispositif peut fonctionner avec une lame d'air épaisse qui permet d'évacuer de l'air avec un débit plus important mais l'augmentation de l'épaisseur du mur dans son ensemble entraîne à son tour une augmentation de l'inertie thermique du mur. En

outre, l'insertion de tasseaux plus épais donc, plus couteux implique un coût plus élevé de ce dispositif de bardage. Par contre, pour le dispositif de bardage avec support mural en béton la plaque de parement en aggloméré de pin avec lame d'air mince paraît suffisante à la réponse du confort thermique puisque le béton doté d'une inertie thermique très forte absorbe le flux thermique non évacué par la lame d'air.

3.6 Lame d'air circulante et non circulante

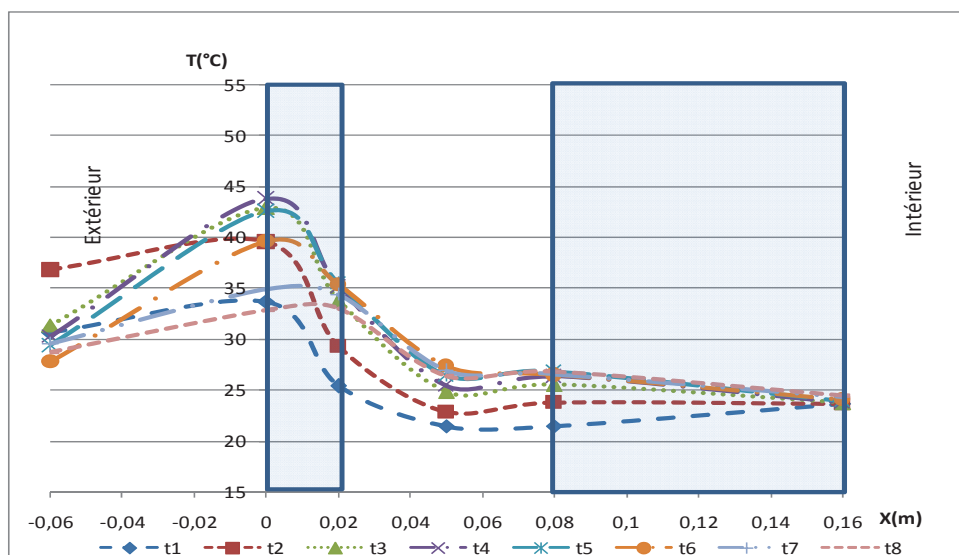
Dans le but d'étudier les performances de l'isolation thermique générée par un bardage bois, en périodes estivale et hivernale, nous avons analysé le comportement du dispositif de bardage avec support mural sur béton en deux configurations de la lame d'air : circulante d'air pour les journées estivales type. Circulante et non circulante d'air pour les journées hivernales type. L'évolution journalière de températures à partir de l'extérieur jusqu'à l'intérieur du mur et le gradient de la température verticale tout au long de la cavité sous l'effet des parois latérales ont été analysés.

Les valeurs horaires de la température mesurée dans le dispositif de bardage en hauteur médiane sont analysées pour mieux comprendre l'évolution des températures. Ces données montrent la variation de la température extérieure de la paroi, de la température de la cavité de l'air et de la température à l'intérieur de la paroi pendant les heures centrales quotidiennes de deux journées de la période hivernale et à chaque journée correspond une configuration de la lame d'air (ouverte ou fermée). Il est évident que les données analysées sont influencées par l'environnement extérieur. Pour cette raison, les figures qui reportent les valeurs mesurées du rayonnement solaire, de la température ambiante, de la vitesse de l'air ambiant et des températures pariétales sont composées de graphiques et tableaux.

3.6.1 Lame d'air épaisse

Les courbes traçant l'évolution des températures dans le dispositif de bardage avec lame d'air épaisse circulante en conditions estivales sont illustrées sur les figures 3.22 et 3.23.

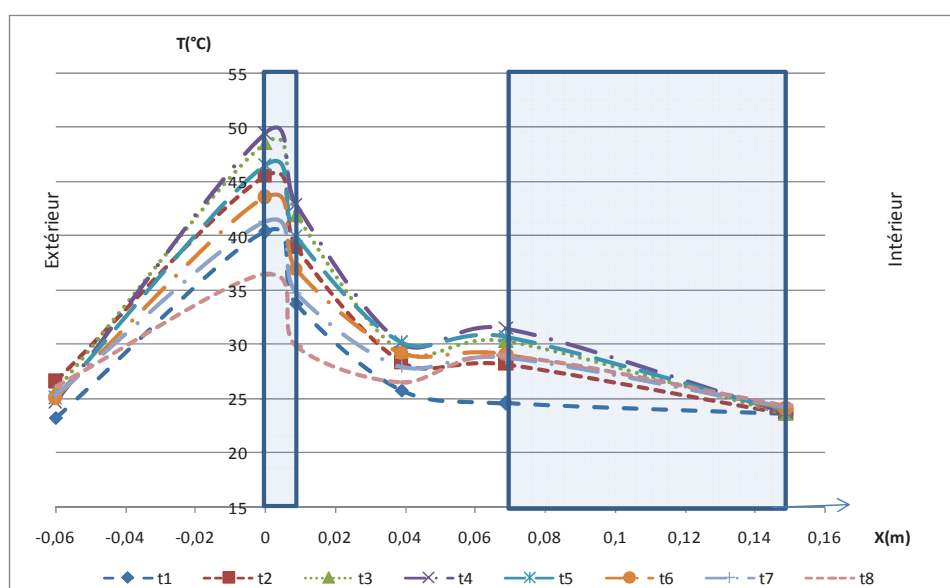
Les tendances du gradient de températures dans les conduites verticales ouvertes pendant les heures centrales de la journée pour les deux plaques de parement (en pin maritime et en aggloméré) sont illustrées sur la figure 3.22.



	Eclairement (W/m^2)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	Vitesse de l'air de la cavité (m/s)	temps (h : min)
t 1	429	2,53	0,25	10h30
t 2	506	2,17	0,39	11h30
t 3	609	3,91	0,48	12h30
t 4	641	5,97	0,5	13h30
t 5	547	3,26	0,44	14h30
t 6	408	4,57	0,36	15h30
t 7	339	2,86	0,26	16h30
t 8	94	2,52	0,19	17h30

Figure 3.22 : Heures représentatives de l'évolution des températures à la mi-hauteur milieu du bardage ouvert (05/08/10) avec lame d'air épaisse et plaque de parement en aggloméré de pin.

Le tableau ci-dessus permet de caractériser le moment du relevé de la mesure, les conditions climatiques dans le milieu ambiant et la vitesse de l'air dans la cavité ouverte.



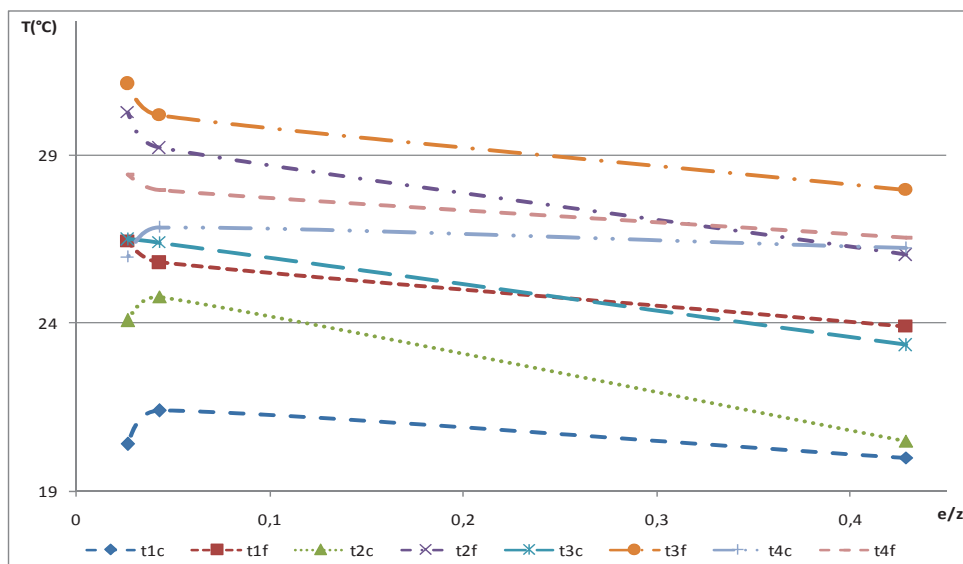
Eclairement	Vitesse de l'air ambiant	Vitesse de l'air de la cavité	temps
-------------	--------------------------	-------------------------------	-------

	(W/m^2)	(m/s)	(m/s)	($h : min$)
t 1	429	2,53	0,25	10h30
t 2	506	2,17	0,39	11h30
t 3	609	3,91	0,48	12h30
t 4	641	5,97	0,5	13h30
t 5	547	3,26	0,44	14h30
t 6	408	4,57	0,36	15h30
t 7	339	2,86	0,26	16h30
t 8	94	2,52	0,19	17h30

Figure 3.23 : Heures représentatives de l'évolution des températures à la mi-hauteur milieu du bardage ouvert (05/08/10) avec lame d'air épaisse et plaque de parement en aggloméré

Sur les figures 3.22 et 3.23 on peut constater que la plaque de parement en aggloméré atteint des températures plus élevées que celles de la plaque en pin maritime et le flux thermique généré dans la lame d'air est évacué et les températures sur la surface intérieure de l'isolant sont constantes. Donc, l'évacuation de l'air entre plaques permet de maintenir une température stable qui annule toute surchauffe de l'habitation intérieure. Le tableau au dessous de la figure permet de caractériser le moment du relevé de la mesure, les conditions climatiques dans le milieu ambiant et la vitesse de l'air dans la cavité ouverte.

L'évolution des températures de l'air sur les trois hauteurs de mesure le long du canal pendant un instant donné est représentée sur la figure 3.24.



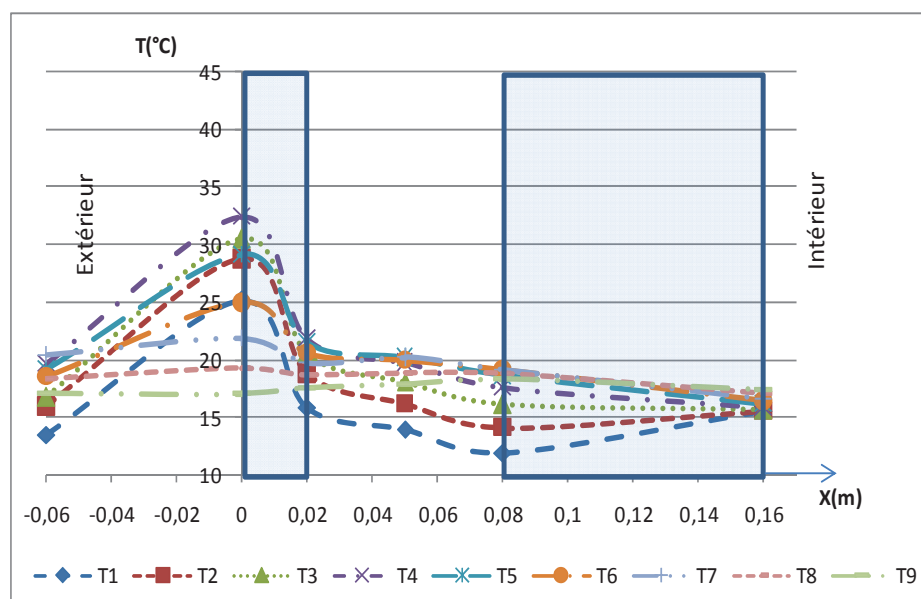
	Eclairement (W/m^2)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	temps ($h : min$)
t1c	429	15,5	10h30
t1f	429	16,6	10h30
t2c	609	16,9	12h30
t2f	609	18,6	12h30
t3c	547	19,2	14h30
t3f	547	18,6	14h30
t4c	339	19,4	16h30
t4f	339	18,3	16h30

Figure 3.24 : Tendence journalière des températures dans la lame d'air épaisse ouverte (05/08/10) pour les deux plaques de parement en pin maritime et aggloméré.

Les courbes de la figure 3.24 représentent l'évolution des températures de l'air dans la lame d'air dans les instants t1c, t2c, t3c, t4c dans le dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime et t1f, t2f, t3f, t4f dans le dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré de pin. Le tableau au dessous de la figure permet de caractériser le moment du relevé de la mesure et les conditions climatiques dans le milieu ambiant. L'analyse de l'évolution des températures est faite en fonction de l'axe z sur trois niveaux (entrée, mi-hauteur et sortie) ce qui modifie le rapport d'aspect (e/z) puisque l'épaisseur de la lame d'air est constante et au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'entrée du canal, le rapport d'aspect diminue.

Les courbes de la figure 3.24 permettent de constater que les températures les plus élevées se situent en hauteur médiane de la lame d'air pour le dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime et à la sortie (le rapport d'aspect est plus petit) du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré pendant les heures centrales de la journée.

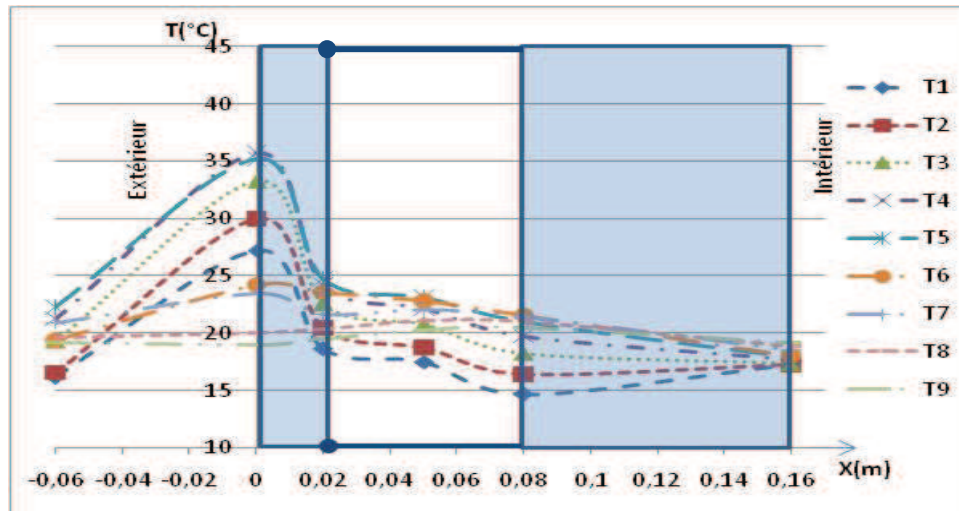
Les courbes traçant l'évolution des températures dans le dispositif de bardage avec lame d'air épaisse circulante et non circulante pour la période hivernale sont illustrées sur les figures 3.25 et 3.26.



	Eclairement (W/m^2)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	Vitesse de l'air de la cavité (m/s)	temps (h : min)
t 1	419	2,53	0,25	10h30
t 2	506	2,17	0,39	11h30
t 3	609	3,91	0,48	12h30
t 4	641	5,97	0,5	13h30
t 5	527	3,26	0,44	14h30
t 6	408	4,57	0,36	15h30
t 7	239	2,86	0,26	16h30
t 8	94	2,52	0,19	17h30

t 9	25	4,23	0,13	18h30
-----	----	------	------	-------

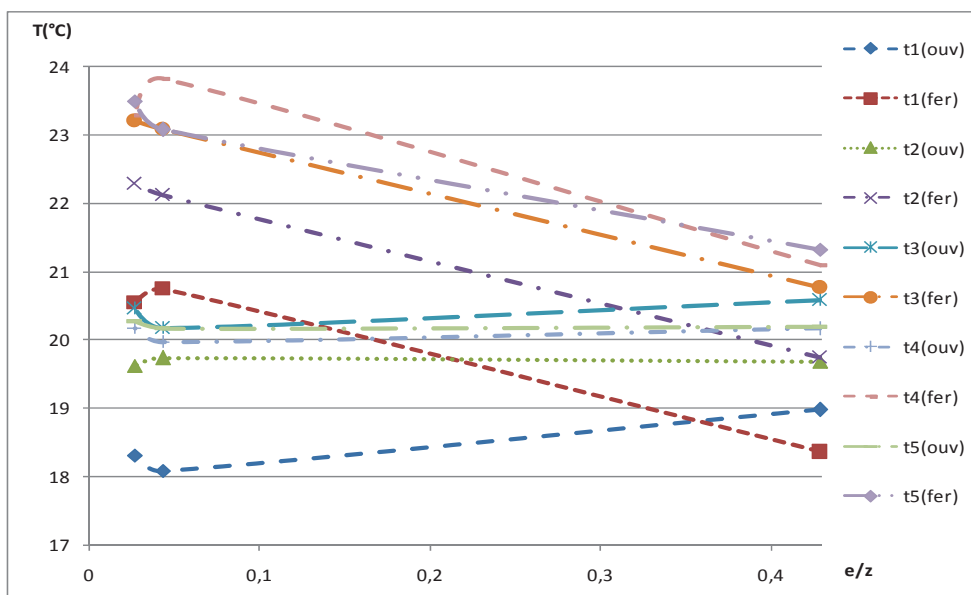
Figure 3.25 : Heures représentatives de l'évolution des températures à la hauteur médiane du dispositif de bardage avec lame d'air épaisse ouverte et plaque de parement en pin maritime (22/03/11) séquence C



	Eclairement (W/m ²)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	Vitesse de l'air de la cavité (m/s)	temps (h : min)
t 1	425	1,23	0,01	10h30
t 2	517	3,05	0,01	11h30
t 3	651	2,42	0,02	12h30
t 4	631	3,19	0,01	13h30
t 5	534	4,46	0,03	14h30
t 6	411	3,92	0,01	15h30
t 7	293	2,76	0,02	16h30
t 8	151	2,35	0,01	17h30
t 9	27	2,44	0,01	18h30

Figure 3.26 : Heures représentatives de l'évolution des températures en hauteur médiane du dispositif de bardage avec lame d'air épaisse non circulante et plaque de parement en pin maritime (24/03/11)

Le gradient de températures dans les conduites verticales ouvertes et fermées, pendant les heures centrales de la journée avec plaque de parement en pin maritime est illustré sur la figure 3.27.

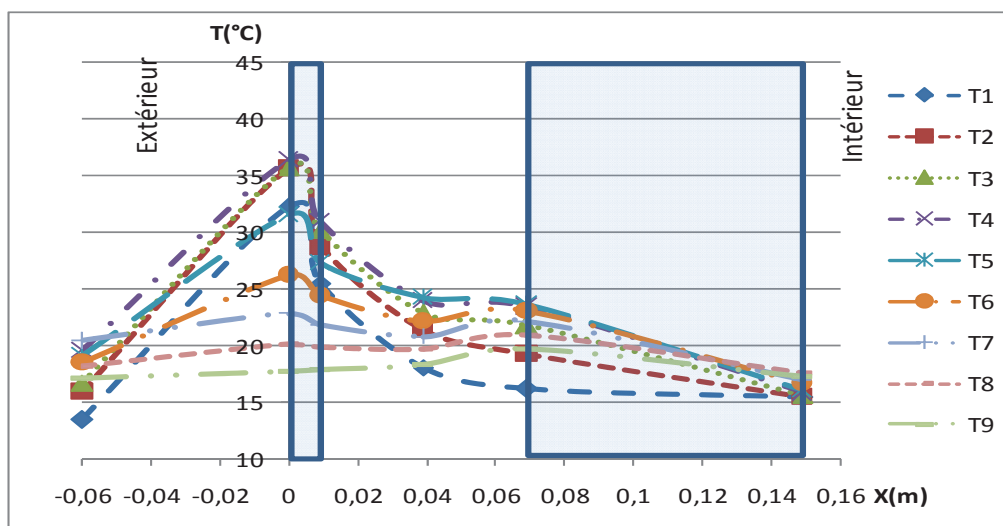


	Eclairement (W/m^2)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	temps (h : min)
t1(ouv)	419	13,5	12h30
t1(fer)	425	15,6	12h30
t2(ouv)	609	16,7	13h30
t2(fer)	631	19,6	13h30
t3(ouv)	527	19,2	14h30
t3(fer)	534	18,6	14h30
t4(ouv)	339	20,4	15h30
t4(fer)	321	18,3	15h30
t5(ouv)	298	17,2	16h30
t5(fer)	293	19,4	16h30

Figure 3.27 : Tendance journalière des températures dans les lames d'air épaisses ouverte (22/03/11) et fermée (24/03/11) avec plaque de parement en pin maritime

Les courbes $T(ouv)$ et $T(fer)$ indiquent les températures mesurées à l'instant t avec lame d'air ouverte ou fermée. Les courbes $T(ouv)$ permettent de constater qu'en début de journée les températures à l'entrée (en bas) du canal sont plus élevées que celles des hauteurs supérieures et elles évoluent ensuite, contrairement aux courbes $T(fer)$ dont les valeurs maximales sont atteintes entre la hauteur médiane et le haut de la cavité fermée tout au long de la journée.

Sur les figures 3.28 et 3.29 sont montrées les valeurs horaires de la température mesurée dans le dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré pour deux journées avec la conduite ouverte et fermée.

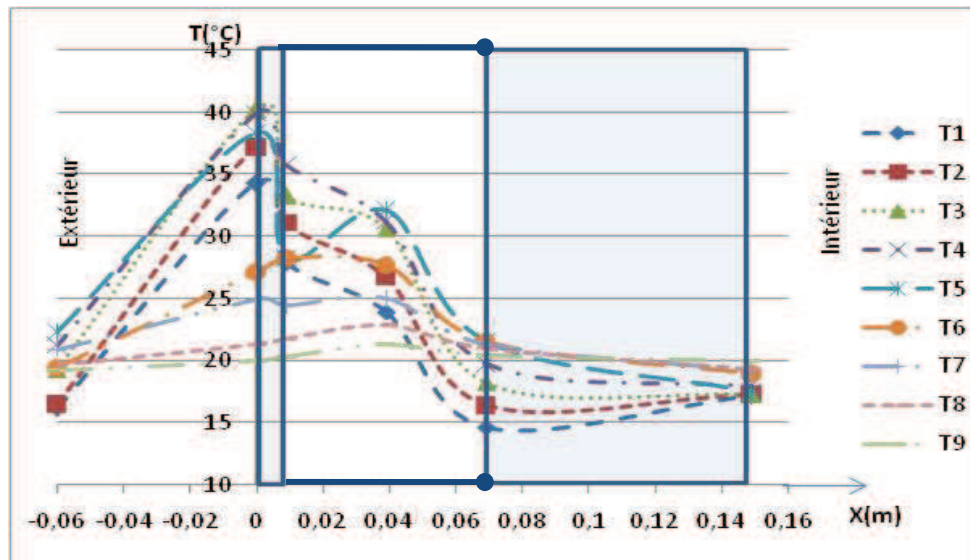


	Eclairement (W/m^2)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	Vitesse de l'air de la cavité (m/s)	temps (h : min)
t1	419	2,53	0,25	10h30
t2	506	2,17	0,49	11h30
t3	609	3,91	0,58	12h30
t4	641	5,97	0,75	13h30
t5	527	3,26	0,83	14h30
t6	408	4,57	0,47	15h30
t7	239	2,86	0,3	16h30
t8	94	2,52	0,21	17h30
t9	25	4,23	0,17	18h30

Figure 3.28 : Heures représentatives de l'évolution des températures en hauteur médiane du bardage ouvert (22/03/11) avec lame d'air épaisse et plaque de parement en aggloméré (séquence C)

Les courbes illustrées sur la figure 3.28 montrent la tendance des valeurs horaires de la température mesurée dans le dispositif de bardage avec lame d'air épaisse circulante et plaque de parement en aggloméré de pin. Ces données montrent la variation de la température ambiante, de la température des surfaces de la plaque de parement, de la température de l'air de la cavité et de la température des surfaces du mur support pendant les heures centrales de la journée hivernale du 22/03/11 de la séquence C.

Pour illustrer les conditions du relevé des mesures et ainsi caractériser les échanges dans le dispositif de bardage avec lame d'air épaisse circulante et plaque de parement en aggloméré de pin, le tableau au dessous de la figure illustre les valeurs mesurées du rayonnement solaire global de la vitesse de l'air ambiant et de la vitesse de l'air de la cavité.



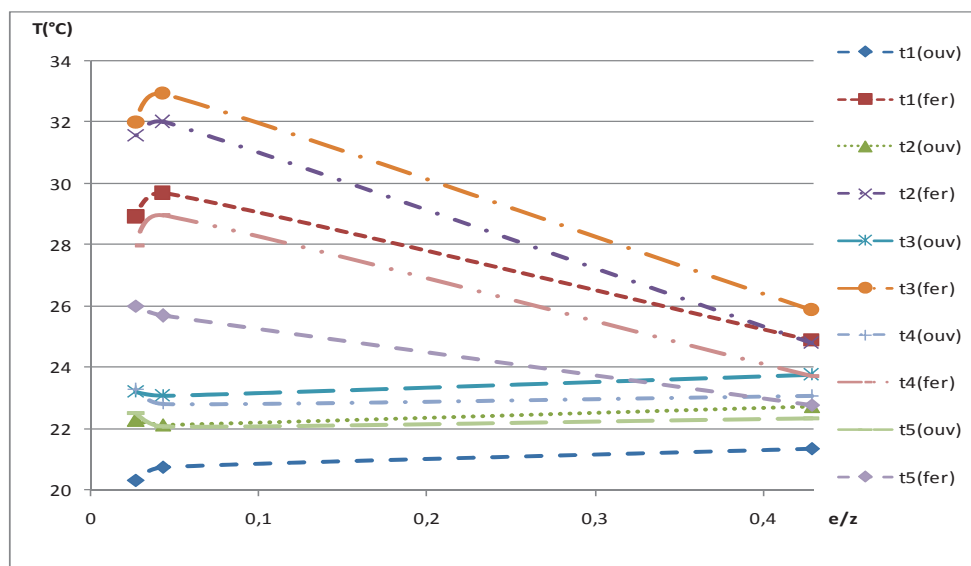
	Eclairement (W/m^2)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	Vitesse de l'air de la cavité (m/s)	temps (h : min)
t1	425	1,23	0,02	10h30
t2	517	3,05	0,02	11h30
t3	651	2,42	0,03	12h30
t4	631	3,19	0,19	13h30
t5	534	4,46	0,17	14h30
t6	411	3,92	0,2	15h30
t7	293	2,76	0,08	16h30
t8	151	2,35	0,04	17h30
t9	27	2,44	0,02	18h30

Figure 3.29 : Heures représentatives de l'évolution des températures en hauteur médiane du bardage fermé (24/03/11) avec lame d'air épaisse et plaque de parement en aggloméré (séquence C)

Les courbes illustrées sur la figure 3.29 montrent la tendance des valeurs horaires de la température mesurée dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince non circulante et plaque de parement en aggloméré de pin. Ces données montrent la variation de la température ambiante, de la température des surfaces de la plaque de parement, de la température de l'air de la cavité et de la température des surfaces du mur support pendant les heures centrales de la journée hivernale du 24/03/11 de la séquence C.

Pour comprendre les conditions du relevé des mesures et ainsi caractériser les échanges dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince non circulante et plaque de parement en aggloméré de pin, le tableau au dessous de la figure illustre les valeurs mesurées du rayonnement solaire global de la vitesse de l'air ambiant et de la vitesse de l'air de la cavité.

Le gradient de températures dans les conduites verticales ouvertes et fermées, pendant les heures centrales des journées ci-dessus avec plaque de parement en aggloméré de pin est illustré sur la figure 3.30.



	Eclairement (W/m^2)	Température ambiante ($^{\circ}\text{C}$)	temps (h : min)
t1(ouv)	419	19,5	12h30
t1(fer)	651	19,3	12h30
t2(ouv)	609	20,7	13h30
t2(fer)	631	21,3	13h30
t3(ouv)	527	19,2	14h30
t3(fer)	534	22,3	14h30
t4(ouv)	429	21,4	15h30
t4(fer)	411	20,9	15h30
t5(ouv)	295	19,2	16h30
t5(fer)	293	19,4	16h30

Figure 3.30 : Tendance journalière des températures dans les lames d'air épaisse ouverte (22/03/11) et épaisse fermée (24/03/11) avec plaque de parement en aggloméré

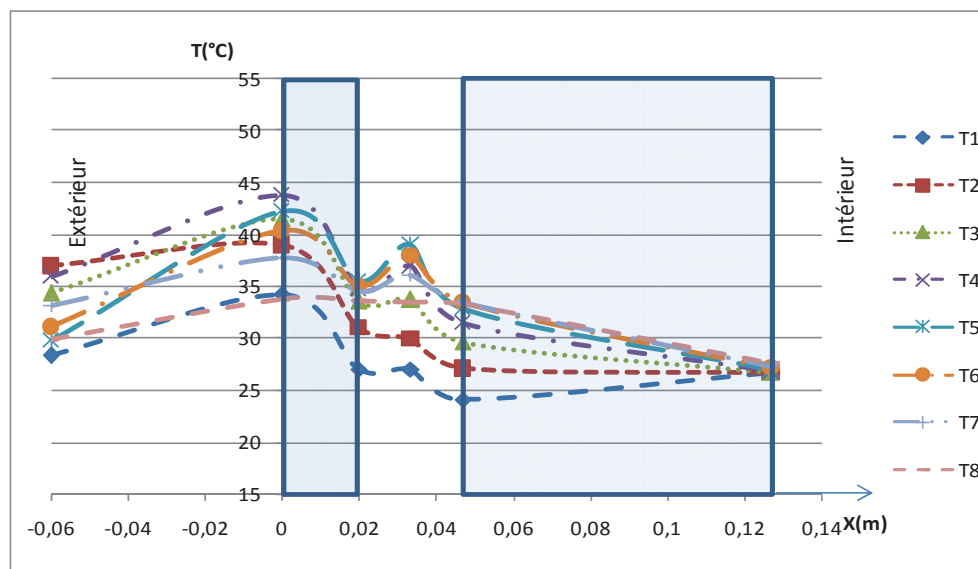
Les courbes $T(\text{ouv})$ et $T(\text{fer})$ indiquent les températures mesurées à l'instant t avec lame d'air ouverte ou fermée. Les courbes $T(\text{ouv})$ permettent de constater que tout au long de la journée, les températures ont des valeurs très proches sur les trois hauteurs de la lame d'air et les courbes $T(\text{fer})$ indiquent une augmentation de température aux niveaux supérieurs du canal où le rapport d'aspect est moins élevé.

Les figures entre 3.22 et 3.30 inclus, reportent les profils des températures dans le mur bardé avec lame d'air épaisse et les gradients de températures le long de la conduite verticale en fonction du rapport d'aspect qui est plus élevé à l'entrée de la lame d'air. Nous constatons que dans le dispositif avec parement en pin maritime, les valeurs mesurées des températures en hauteur médiane sont modérées, elles oscillent autour de 20°C pour la lame d'air circulante et 23°C pour la non circulante et ceci pendant la période de rayonnement solaire maximal.

Le dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré accumule plus de chaleur dans la lame d'air dû au fait que la plaque en aggloméré est moins résistive à la chaleur et à cause de sa couleur a une absorptivité et réflectivité différentes de celle de la plaque en pin maritime. Les valeurs maximales de températures sont atteintes à la sortie de la lame d'air où le rapport d'aspect est le moins élevé.

3.6.2 lame d'air mince

Les courbes traçant l'évolution des températures dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince circulante en conditions estivales sont illustrées sur les figures 3.31 et 3.32.

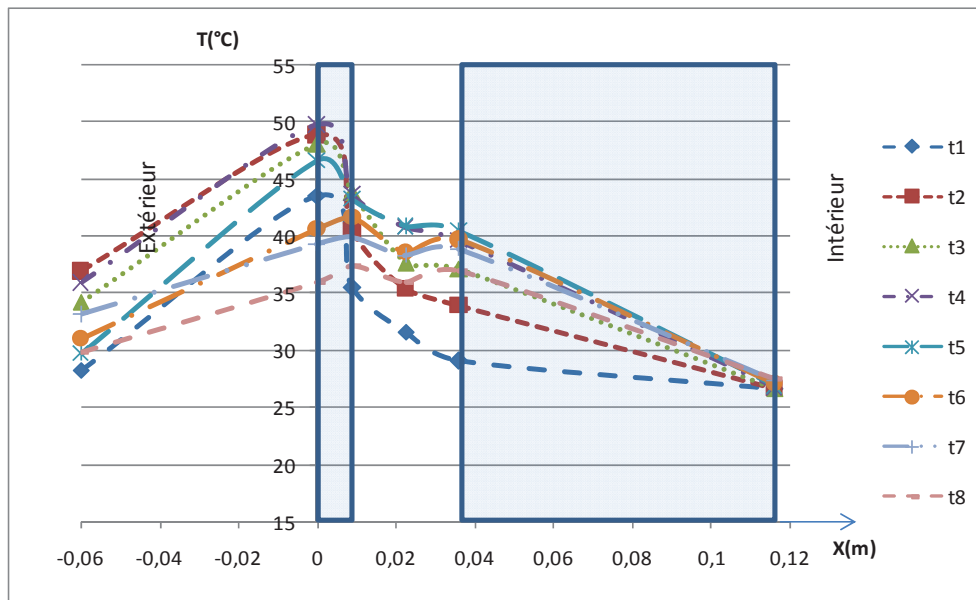


	Eclairement (W/m ²)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	Vitesse de l'air de la cavité (m/s)	temps (h : min)
t 1	420	2,53	0,25	10h30
t 2	506	2,17	0,39	11h30
t 3	621	3,91	0,48	12h30
t 4	641	5,97	0,5	13h30
t 5	564	3,26	0,44	14h30
t 6	408	4,57	0,36	15h30
t 7	321	2,86	0,26	16h30
t 8	94	2,52	0,19	17h30

Figure 3.31 : Heures représentatives de l'évolution des températures à la mi-hauteur milieu du bardage ouvert (20/07/10) avec lame d'air mince et plaque de parement en pin maritime.

Les courbes illustrées sur les figures 3.31 et 3.32 montrent la tendance des valeurs horaires de la température mesurée dans les dispositifs de bardage avec lame d'air mince et plaques de parement en pin maritime et aggloméré de pin. Ces données montrent la variation de la température ambiante, de la température des surfaces de la plaque de parement, de la température de l'air de la cavité et de la température des surfaces du mur support pendant les heures centrales d'une journée estivale (20/07/10) de la séquence B.

Pour caractériser les échanges dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince et plaque de parement en pin maritime, le tableau ci-dessus illustre les valeurs mesurées du rayonnement solaire global de la vitesse de l'air ambiant et de la vitesse de l'air de la cavité.

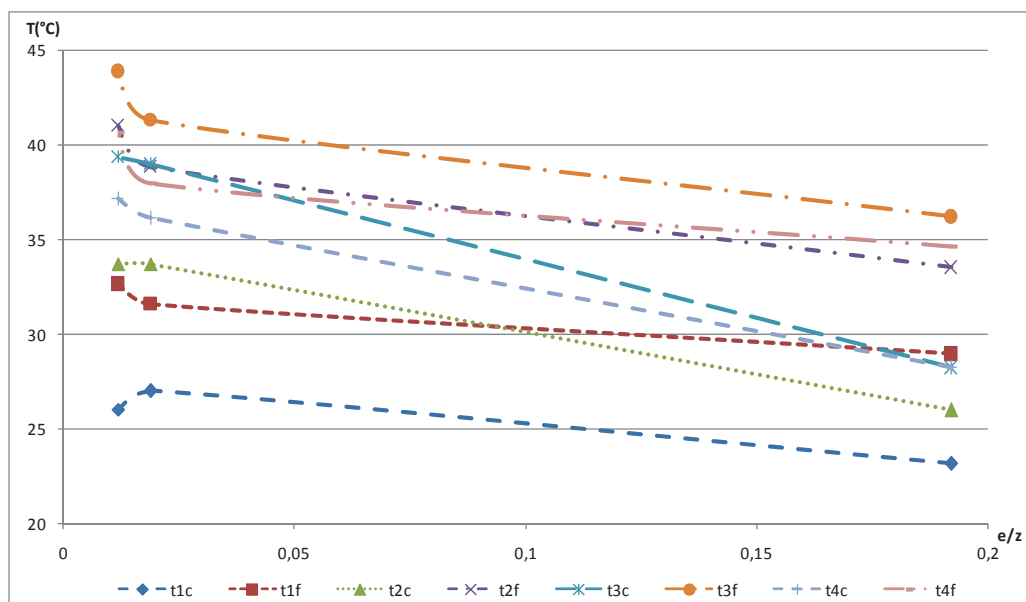


	Eclairement (W/m ²)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	Vitesse de l'air de la cavité (m/s)	temps (h : min)
t 1	420	2,53	0,35	10h30
t 2	506	2,17	0,41	11h30
t 3	621	3,91	0,48	12h30
t 4	641	5,97	0,51	13h30
t 5	564	3,26	0,46	14h30
t 6	408	4,57	0,37	15h30
t 7	321	2,86	0,28	16h30
t 8	94	2,52	0,19	17h30

Figure 3.32 : Heures représentatives de l'évolution des températures à la mi-hauteur milieu du bardage ouvert (20/07/10) avec lame d'air mince et plaque de parement en aggloméré.

Sur les figures 3.31 et 3.32 on peut constater que la plaque de parement en aggloméré atteint des températures plus élevées que celles de la plaque en pin maritime et la température dans la lame d'air avant d'être évacuée a une valeur maximale proche de 40°C dans le dispositif avec plaque en pin maritime et supérieure à 40°C dans le dispositif avec plaque de parement en aggloméré. L'évacuation de cette chaleur permet de maintenir les températures sur la surface intérieure de l'isolant constantes. Donc, l'évacuation de l'air entre plaques permet de maintenir une température stable qui annule toute surchauffe de l'habitation intérieure malgré les valeurs atteintes.

Les tendances du gradient de températures dans les conduites verticales ouvertes pendant les heures centrales de la journée pour les deux plaques de parement (en pin maritime et en aggloméré) sont illustrées sur la figure 3.33.



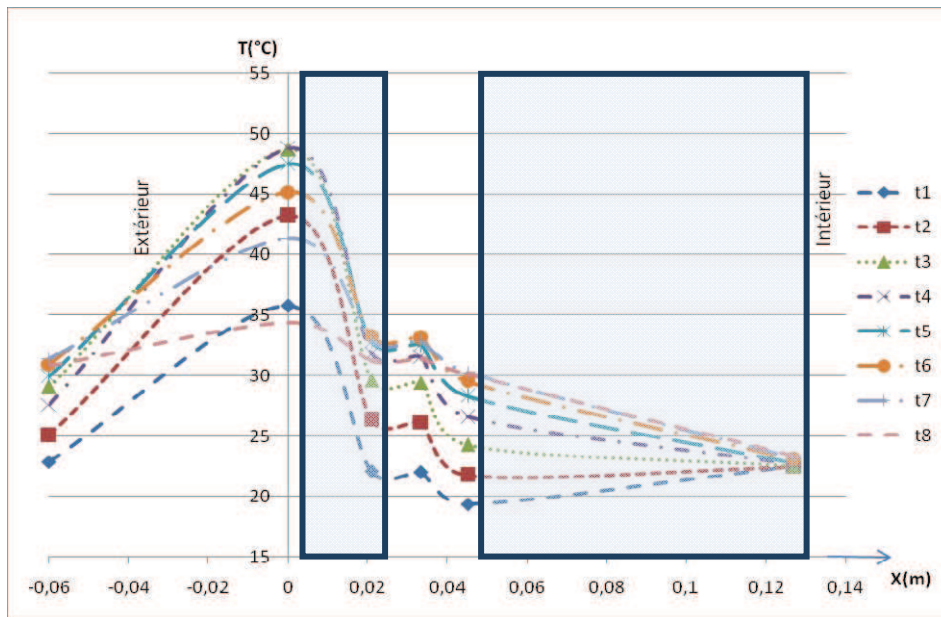
	Eclairement (W/m^2)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	temps (h : min)
t1c	420	16,5	10h30
t1f	420	16,6	10h30
t2c	621	15,9	12h30
t2f	621	18,6	12h30
t3c	564	19,2	14h30
t3f	564	17,6	14h30
t4c	321	19,4	16h30
t4f	321	19,3	16h30

Figure 3.33 : Gradient de températures dans les conduites verticales ouvertes pendant les heures centrales de la journée pour les deux plaques de parement (en pin maritime et en aggloméré)

Les courbes T1c, T2c, T3c, T4c et T1f, T2f, T3f, T4f indiquent les températures mesurées à l'instant t dans les dispositifs de bardage avec plaques de parement en pin maritime ou en aggloméré de pin et lame d'air mince ouverte. Les courbes tc permettent de constater que tout au long de la journée, les températures du dispositif avec parement en pin maritime atteignent les valeurs maximales à la sortie du canal en fin de journée et les courbes tf indiquent des valeurs maximales à la sortie de la lame d'air pour le dispositif de bardage avec parement en aggloméré de pin.

Les courbes de la figure 3.33 permettent de constater que les températures les plus élevées sont en hauteur médiane de la lame d'air pour le dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime et elles se situent à la sortie (le rapport d'aspect est plus petit) du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré pendant les heures centrales de la journée.

Les courbes traçant l'évolution des températures dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince circulante et non circulante avec plaque de parement en pin maritime sont illustrées sur les figures 3.34 et 3.35.

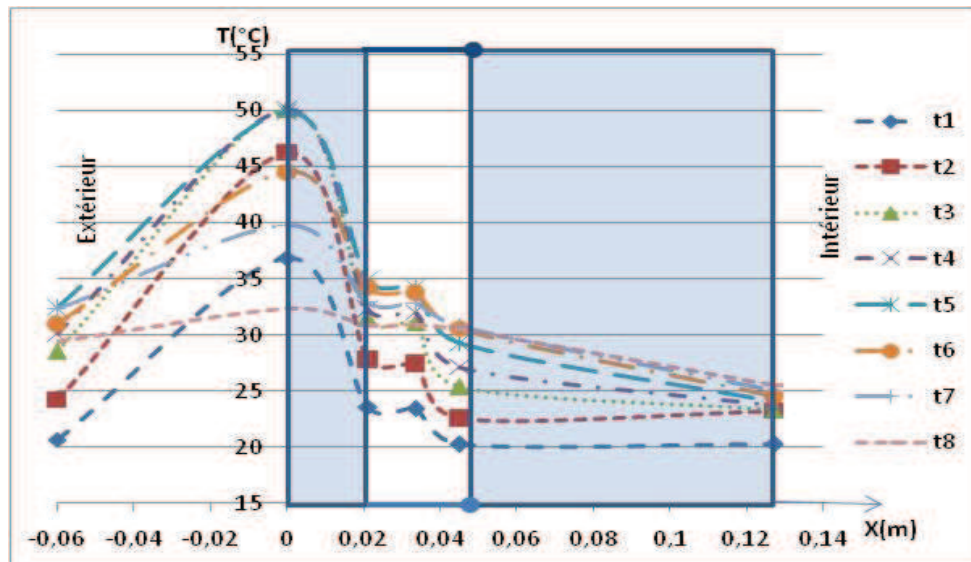


	Eclairement (W/m^2)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	Vitesse de l'air de la cavité (m/s)	temps (h : min)
t1	452	2,5	0,26	10h30
t2	587	4,27	0,38	11h30
t3	635	3,27	0,43	12h30
t4	617	1,23	0,58	13h30
t5	532	3,26	0,59	14h30
t6	402	3,25	0,55	15h30
t7	271	2,01	0,43	16h30
t8	113	2,51	0,35	17h30
t9	56	1,13	0,22	18h30

Figure 3.34 : Heures représentatives de l'évolution des températures en hauteur médiane du bardage ouvert avec lame d'air mince (08/04/11), plaque de parement en pin maritime

Les courbes illustrées sur la figure 3.34 montrent la tendance des valeurs horaires de la température mesurée dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince circulante et plaque de parement en pin maritime. Ces données montrent la variation de la température ambiante, de la température des surfaces de la plaque de parement, de la température de l'air de la cavité et de la température des surfaces du mur support pendant les heures centrales de la journée hivernale du 08/04/11 de la séquence C.

Pour comprendre les conditions climatiques du relevé des mesures et ainsi caractériser les échanges dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince non circulante et plaque de parement en pin maritime, le tableau au dessous de la figure illustre les valeurs mesurées du rayonnement solaire global de la vitesse de l'air ambiant et de la vitesse de l'air de la cavité.



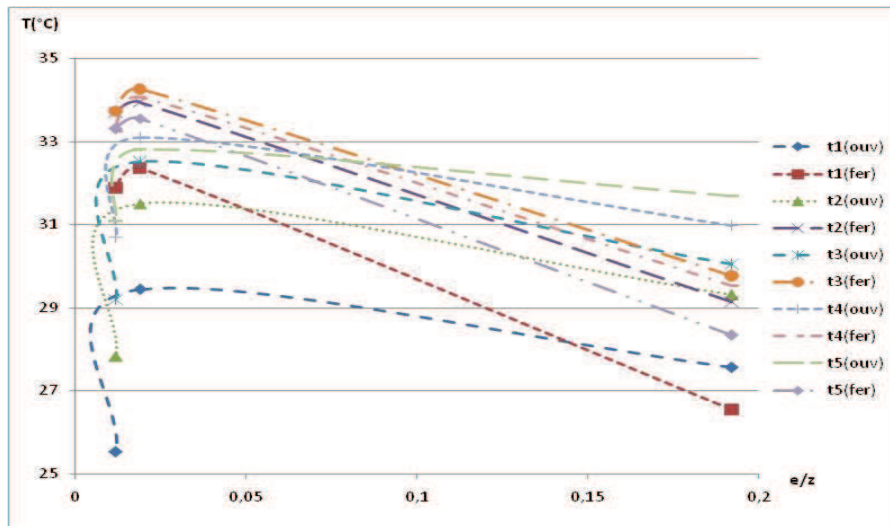
	Eclairement (W/m^2)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	Vitesse de l'air de la cavité (m/s)	temps (h : min)
t1	546	2,77	0,04	10h30
t2	640	5,31	0,04	11h30
t3	653	4,26	0,06	12h30
t4	600	1,26	0,02	13h30
t5	495	3,23	0,02	14h30
t6	338	3,15	0,01	15h30
t7	194	2,71	0,01	16h30
t8	76	2,52	0,02	17h30
t9	48	1,55	0,01	18h30

Figure 3.35 : Heures représentatives de l'évolution des températures en hauteur médiane de la lame d'air fermée mince (09/04/11), plaque de parement en pin maritime

Les courbes illustrées sur la figure 3.35 montrent la tendance des valeurs horaires de la température mesurée dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince non circulante et plaque de parement en pin maritime. Ces données montrent la variation de la température ambiante, de la température des surfaces de la plaque de parement, de la température de l'air de la cavité et de la température des surfaces du mur support pendant les heures centrales de la journée hivernale du 09/04/11 de la séquence C.

Pour comprendre les conditions du relevé des mesures et ainsi caractériser les échanges dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince non circulante et plaque de parement en pin maritime, le tableau au dessous de la figure illustre les valeurs mesurées du rayonnement solaire global de la vitesse de l'air ambiant et de la vitesse de l'air de la cavité.

Le gradient de température vertical le long de la lame d'air ouverte et de la cavité parallélépipédique fermée pendant les heures centrales des journées hivernales ensoleillées type (08/04/11) et (09/04/11), est illustré sur la figure 3.36.

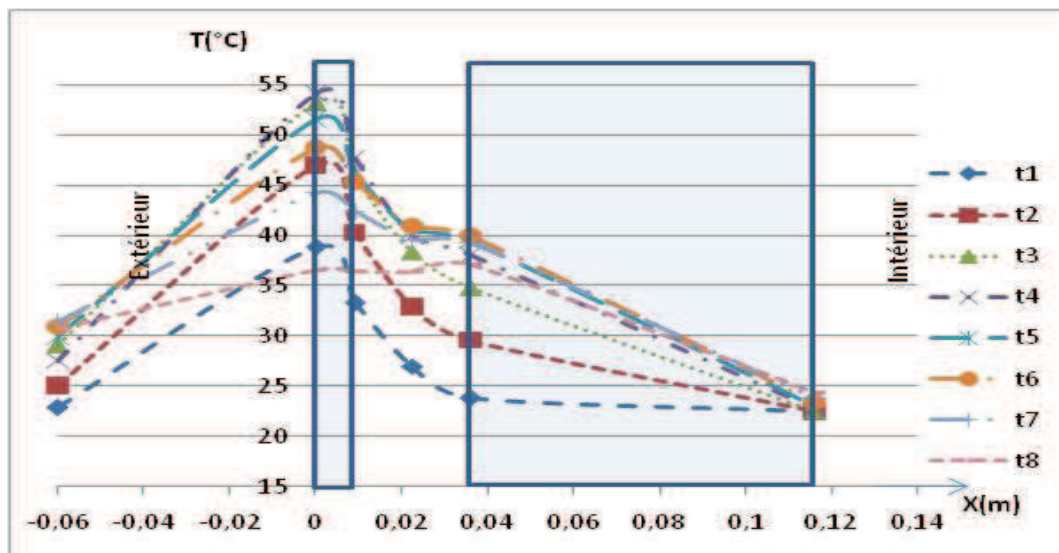


	Eclairement (W/m^2)	Température ambiante (°C)	temps (h : min)
t1(ouv)	635	29,1	12h30
t1(fer)	653	28,5	12h30
t2(ouv)	635	29,1	13h30
t2(fer)	600	30,1	13h30
t3(ouv)	532	29,9	14h30
t3(fer)	495	32,4	14h30
t4(ouv)	471	31,4	15h30
t4(fer)	338	31,1	15h30
t5(ouv)	216	31,8	16h30
t5(fer)	194	32,3	16h30

Figure 3.36 : Tendence journalière des températures dans la lame d'air mince ouverte (08/04/11) et dans la cavité parallélépipédique fermée (09/04/11) sur le rapport d'aspect (e/H) pour plaque de parement en pin maritime

Les courbes $T(ouv)$ et $T(fer)$ sur la figure 3.36 indiquent les températures mesurées à l'instant t avec lame d'air ouverte ou fermée. Ces courbes permettent de constater que tout au long de la journée, les températures ont des valeurs maximales en hauteur médiane et en haut de la lame d'air où le rapport d'aspect est moins élevé.

Les courbes traçant l'évolution des températures dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince circulante avec plaque de parement en aggloméré sont illustrées sur la figure 3.37.



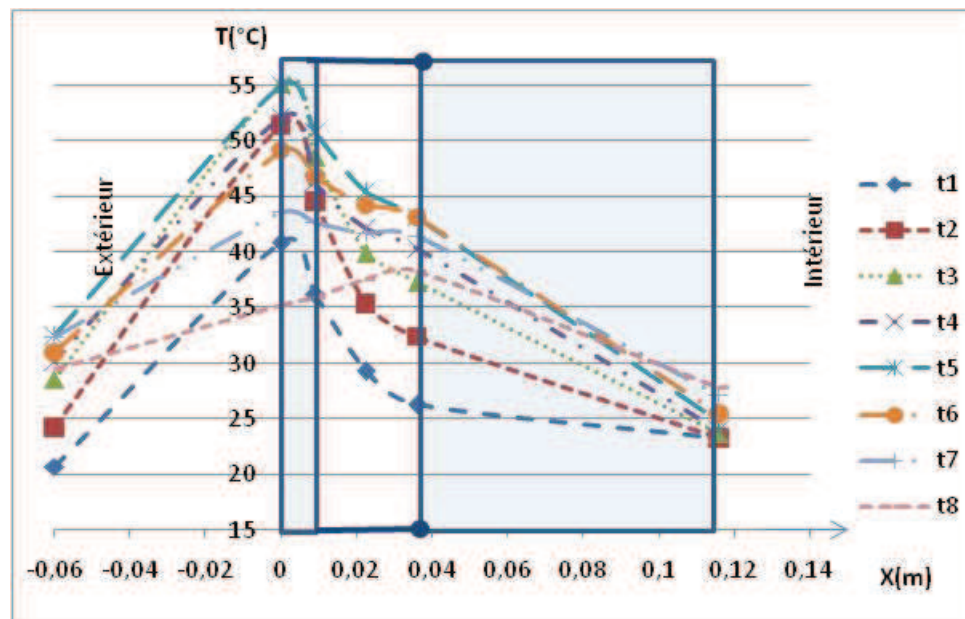
	Eclairement (W/m^2)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	Vitesse de l'air de la cavité (m/s)	temps (h : min)
t1	452	2,5	0,24	10h30
t2	587	4,27	0,31	11h30
t3	635	3,27	0,41	12h30
t4	617	1,23	0,56	13h30
t5	532	3,26	0,78	14h30
t6	402	3,25	0,77	15h30
t7	271	2,01	0,55	16h30
t8	113	2,51	0,31	17h30

Figure 3.37 : Heures représentatives de l'évolution des températures à la hauteur médiane du bardage mince ouvert (08/04/11) avec plaque de parement en aggloméré

Les courbes illustrées sur la figure 3.37 montrent la tendance des valeurs horaires de la température mesurée dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince circulante et plaques de parement en aggloméré de pin. Ces données montrent la variation de la température ambiante, de la température des surfaces de la plaque de parement, de la température de l'air de la cavité et de la température des surfaces du mur support pendant les heures centrales de la journée hivernale du 08/04/11 de la séquence C.

Pour illustrer les conditions d'obtention de ces mesures et ainsi caractériser les échanges dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince et plaque de parement en aggloméré de pin, le tableau ci-dessus illustre les valeurs mesurées du rayonnement solaire global de la vitesse de l'air ambiant et de la vitesse de l'air de la cavité.

Les courbes traçant l'évolution des températures dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince non circulante et plaque de parement en aggloméré sont illustrées sur la figure 3.38.



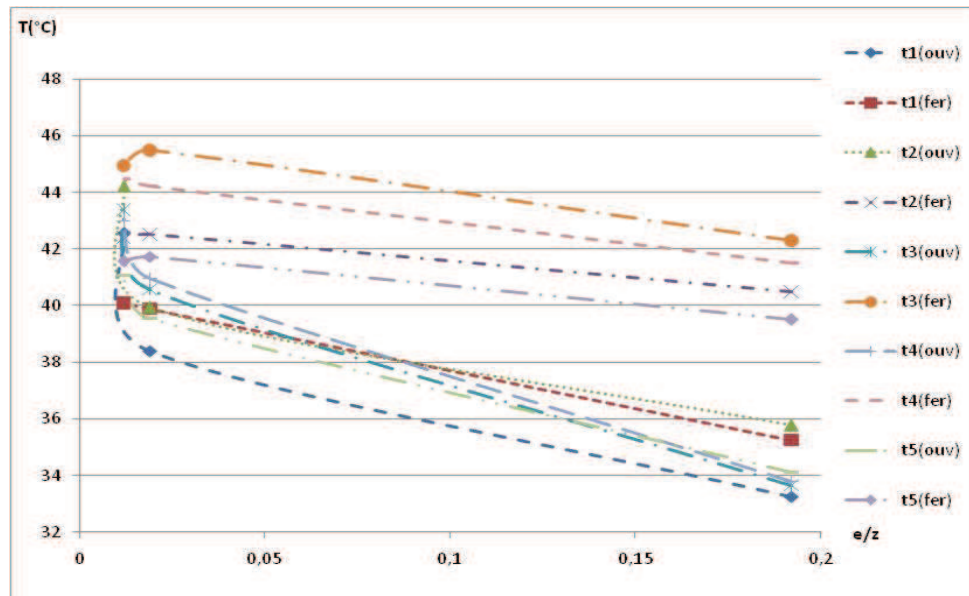
	Eclairement (W/m^2)	Vitesse de l'air ambiant (m/s)	Vitesse de l'air de la cavité (m/s)	temps (h : min)
t1	546	2,77	0,15	10h30
t2	640	5,31	0,05	11h30
t3	653	4,26	0,08	12h30
t4	600	1,26	0,04	13h30
t5	495	3,23	0,03	14h30
t6	338	3,15	0,06	15h30
t7	194	2,71	0,05	16h30
t8	76	2,52	0,02	17h30

Figure 3.38 : Heures représentatives de l'évolution des températures à la mi-hauteur de la lame d'air mince fermée (09/04/11) avec plaque de parement en aggloméré

Les courbes illustrées sur la figure 3.38 montrent la tendance des valeurs horaires de la température mesurée dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince non circulante et plaques de parement en aggloméré de pin. Ces données montrent la variation de la température ambiante, de la température des surfaces de la plaque de parement, de la température de l'air de la cavité et de la température des surfaces du mur support pendant les heures centrales de la journée hivernale du 09/04/11 de la séquence C.

Pour comprendre les conditions du relevé des mesures et ainsi caractériser les échanges dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince non circulante et plaque de parement en aggloméré de pin, le tableau au dessous de la figure 3.38 illustre les valeurs mesurées du rayonnement solaire global de la vitesse de l'air ambiant et de la vitesse de l'air de la cavité.

Le gradient de température vertical le long de la lame d'air ouverte et de la cavité parallélépipédique fermée pendant les heures centrales des journées hivernales ensoleillées type (08/04/11) et (09/04/11), pour plaque de parement en aggloméré, est illustré sur la figure 3.38.



	Eclairement (W/m^2)	Température ambiante (°C)	temps (h : min)
t1(ouv)	635	29,1	12h30
t1(fer)	653	28,5	12h30
t2(ouv)	617	27,6	13h30
t2(fer)	600	30,1	13h30
t3(ouv)	532	29,9	14h30
t3(fer)	495	32,4	14h30
t4(ouv)	402	30,9	15h30
t4(fer)	338	31,1	15h30
t5(ouv)	198	28,8	16h30
t5(fer)	194	32,3	16h30

Figure 3.39 : Tendence journalière des températures de la lame d'air mince ouverte (08/04/11) et dans la cavité parallélépipédique fermée (09/04/11) sur le rapport d'aspect (e/H) pour plaque de parement en aggloméré

Les figures allant de 3.31 à 3.39, reportent les profils de températures dans le mur bardé avec lame d'air mince ouverte ou fermée et les gradients de températures tout au long de la lame d'air en fonction du rapport d'aspect qui a sa valeur maximale à l'entrée de la lame d'air. Nous constatons que dans ce dispositif, les valeurs mesurées des températures en hauteur médiane sont plus élevées que celles correspondantes dans la lame d'air épaisse.

Le rôle de la plaque de parement est d'absorber le rayonnement solaire incident afin d'accroître la température pariétale de la cavité. La valeur maximale de la température de l'air tend à croître ou à décroître en fonction du rayonnement solaire. Pendant l'accroissement de la température de l'air dans le dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime et la lame d'air mince ouverte, la valeur maximale est atteinte en hauteur médiane, où le rapport d'aspect est moyen et, dans le dispositif avec plaque de parement en aggloméré avec lame d'air circulante ou non circulante, la température atteint sa valeur maximale où le rapport d'aspect est le plus petit.

En augmentant l'écartement entre plaque de parement et le mur isolant donc, la lame d'air devient épaisse, le rapport d'aspect (e/H) augmente aussi, mais les températures

dans la lame d'air atteignent des valeurs maximales inférieures à celles de la lame d'air mince.

L'analyse des courbes le long de la lame d'air dans les cavités fermées nous permet de constater que les températures en bas où le rapport d'aspect est le plus grand, sont nettement inférieures à celles de la hauteur médiane et en haut qui, en revanche, sont très proches l'une de l'autre et les plus grandes valeurs de températures sont en hauteur médiane. Ceci nous fait constater la quasi absence de gradient de températures à partir de la hauteur médiane. Donc, nous avons de la stratification thermique au sein de la cavité. Les figures 3.40 et 3.41 illustrent ce phénomène.

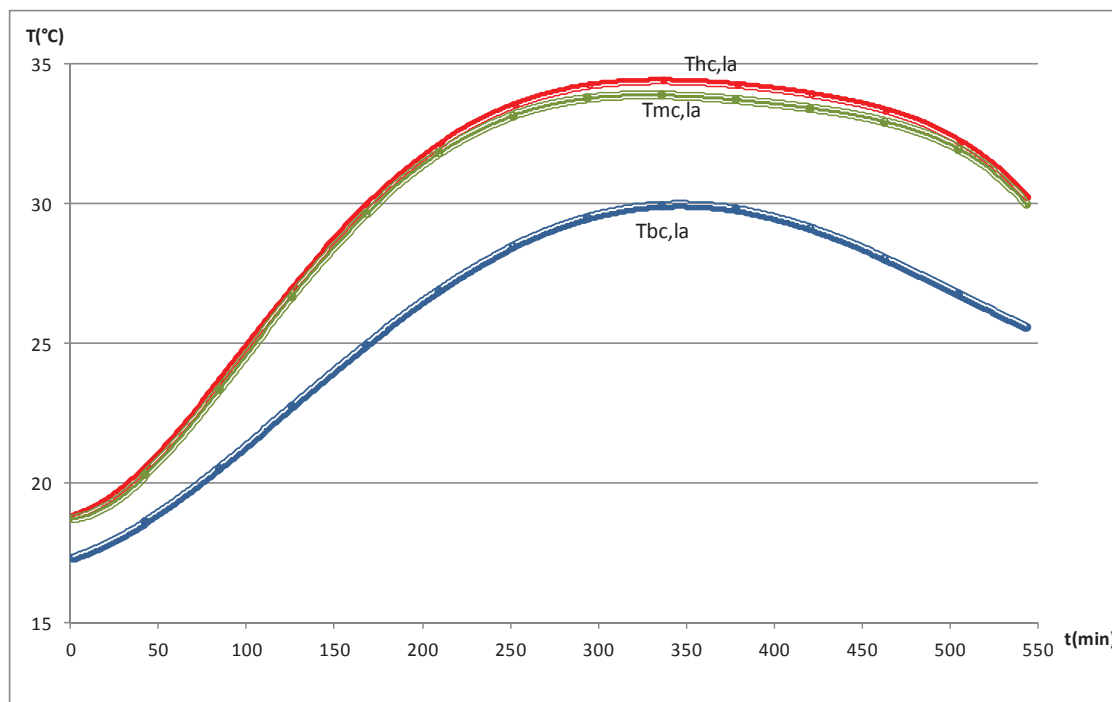


Figure 3.40 : Evolution journalière des températures de l'air dans la lame d'air mince fermée (09/04/11); plaque en pin maritime (séquence C)

L'allure des courbes illustrées sur les figures 3.40 et 3.41 permettent de constater que les températures dans la cavité fermée ont une évolution influencée par la nature et caractéristiques thermiques des plaques de parement.

L'intérêt de la comparaison des profils de températures entre les dispositifs de lames d'air ouvertes et fermées est de montrer la direction du flux thermique à travers le mur intérieur et l'élévation maximale de la température dans la cavité à une certaine hauteur. En effet, si le mur bardé avec lame d'air ouverte permet de maintenir la température interne de l'habitable, le mur bardé fermé (figures 3.26, 3.29, 3.35, et 3.38) devient une composante active du chauffage de l'environnement interne.

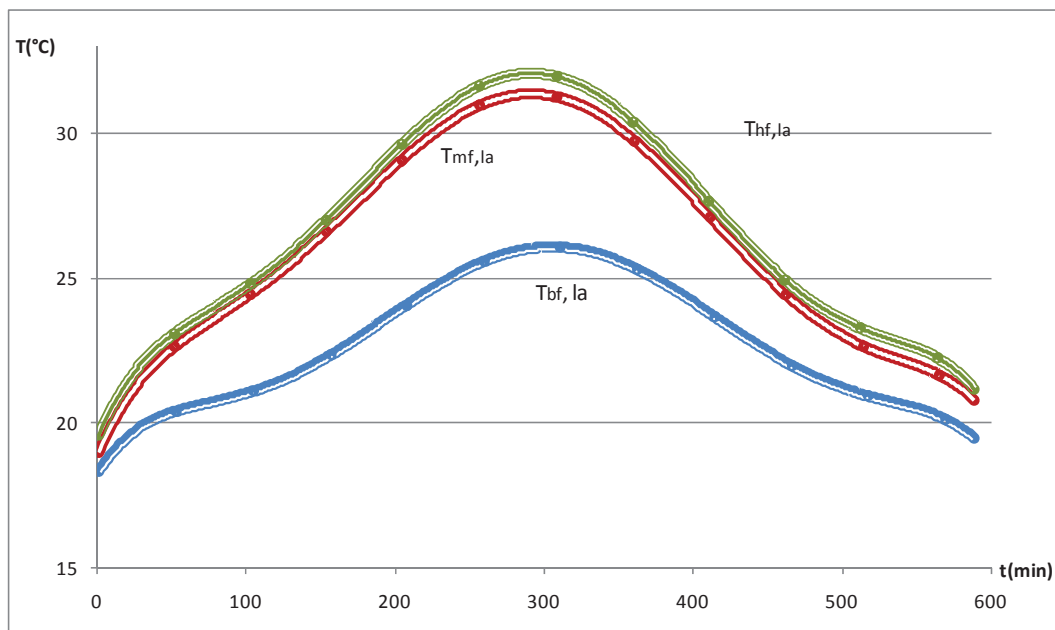


Figure 3.41 : Evolution journalière des températures de l'air dans la lame d'air épaisse fermée (24/03/11); plaque en aggloméré du pin (séquence C)

3.7 Différence de comportements liés aux murs supports

L'analyse du comportement thermique des murs isolants des dispositifs de bardage des sites de Levignacq et de l'ENSAM a été réalisée en hauteur médiane suivant les thermocouples installés pour mesurer la température interstitielle (voir Chapitre 2, figures 2.5 et 2.6).

Les figures 3.42 et 3.43 illustrent les températures des différentes composantes de ces murs multicouches.

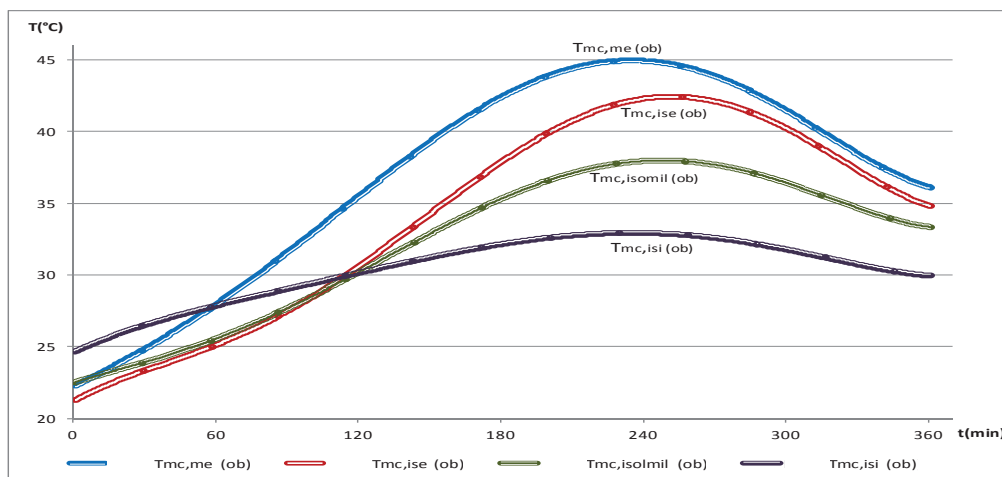


Figure 3.42 : Evolution des températures au sein du mur isolant en ossature bois (06/10/09) avec plaque de parement en pin maritime (séquence A)

Sur les figures 3.42 et 3.43 nous avons constaté que les températures à travers le mur, à partir de la surface extérieure vers la surface intérieure évoluent en sinusoïdale.

L'amplitude de la courbe $T_{mc,me}$ (1) de la figure 3.42, qui symbolise la température de la surface extérieure du mur composite à ossature bois est plus accentuée que celle du support sur béton sur la figure 3.43. Au fur et à mesure que l'on progresse vers l'intérieur, les amplitudes des courbes décroissent graduellement et ceci dû à la réduction des températures qui est plus prononcée sur le mur à ossature bois.

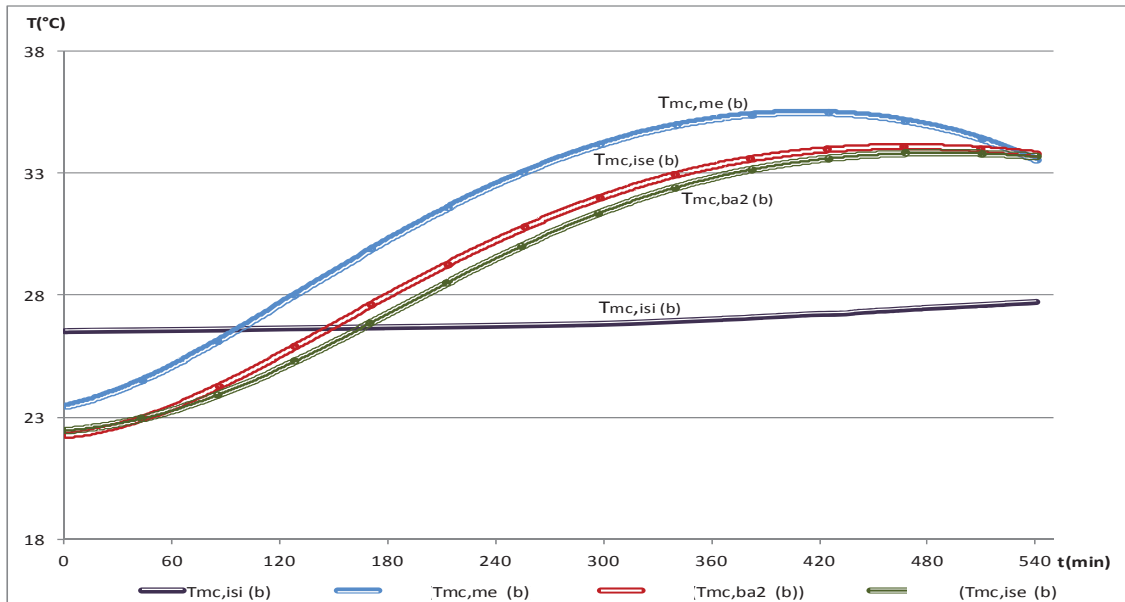


Figure 3.43 : Evolution des températures au sein du support isolant sur béton (20/07/10) avec plaque de parement en pin maritime (séquence B)

La décroissance de l'amplitude des températures dépend des propriétés thermophysiques comme la conductivité thermique λ , la densité ρ et la capacité thermique C_p des matériaux du mur et de leur épaisseur. Ceci est visible en comparant les courbes de deux graphiques puisque sur le mur à ossature bois le contreventement en panneau de particules de la figure 2.25 qui a une conductivité thermique très inférieure à celle de la plaque de plâtre, réduit plus de température (4 $^{\circ}C$) que les deux plâtres du support mural de l'ENSAM, (2 $^{\circ}C$).

On constate aussi que l'isolant en laine de verre du mur en ossature bois qui est plus épais que celui du support sur béton de l'ENSAM réduit aussi plus de chaleur.

3.8 La relation entre la vitesse et température de l'air entre plaques

L'énergie solaire absorbée par la plaque de parement provoque par convection une élévation de température entre plaques qui génère un mouvement ascendant de l'air. La relation entre la vitesse de l'air et sa température détermine la dynamique de cet écoulement.

Les figures ci-dessous illustrent la relation entre la température et vitesse de l'air pour deux journées ensoleillées estivales dans les dispositifs de bardage avec plaques de parement en pin maritime et en aggloméré de pin.

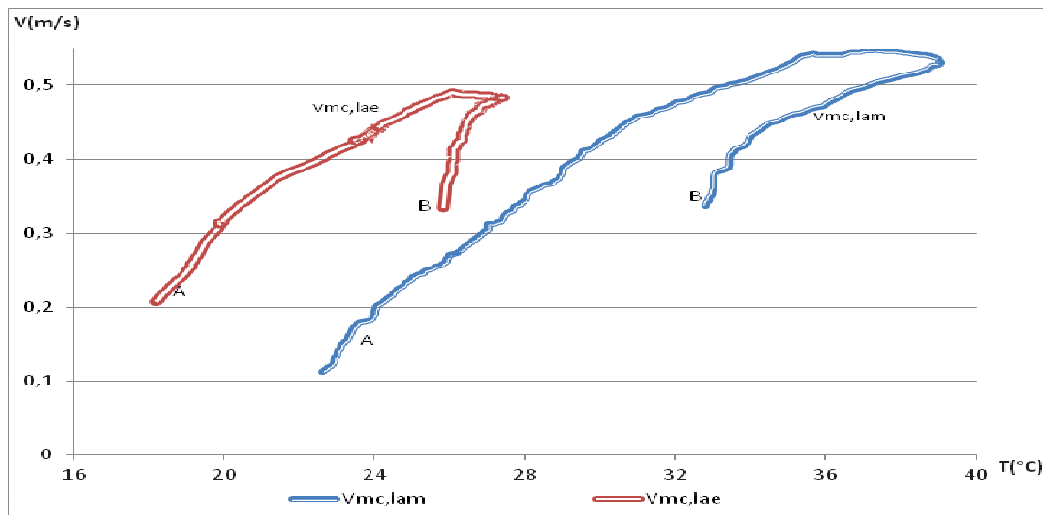


Figure 3.44 : Evolution de la vitesse de l'air en fonction de la température de l'air en hauteur médiane du mur en béton bardé avec plaque de parement en pin maritime et lames d'air mince (20/07/10) et épaisse (05/08/10)

Les courbes $v_{mc,lam}$ et $v_{mc,lae}$ de la figure 3.44 symbolisent les vitesses de l'air dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince et épaisse avec plaque de parement en pin maritime et les courbes $v_{mf,lam}$ et $v_{mf,lae}$ de la figure 3.45 représentent les vitesses de l'air dans le dispositif de bardage avec lame d'air mince et épaisse avec plaque de parement en aggloméré de pin, respectivement. Les points A et B déterminent le début et la fin des écoulements.

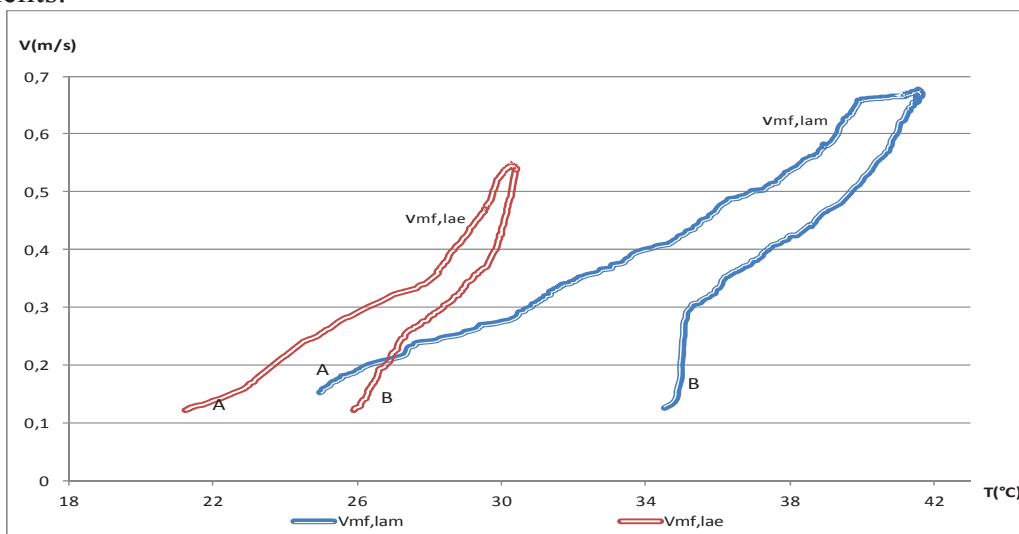


Figure 3.45 : Evolution de la vitesse de l'air en fonction de la température de l'air en hauteur médiane du mur en béton bardé avec plaque de parement en aggloméré et lames d'air mince (20/07/10) et épaisse (05/08/10)

L'allure convexe des courbes de la relation entre la vitesse et la température dans le dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime (voir figure : 3.44) nous montre que dans ce dispositif il y a un apport d'énergie moins important que dans le dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré de pin (voir figure : 3.45) dont l'allure des courbes est quasi exponentielle ou concave. La vitesse de l'air dans les dispositifs avec plaque de parement en pin maritime varie avec des amplitudes moins fortes

que celle du dispositif avec plaque de parement en aggloméré de pin et ceci dû au fait que la plaque de parement en aggloméré de pin a moins d'inertie que la plaque en pin maritime.

3.9 Influence du rapport d'aspect

Considérant que les dispositifs expérimentaux analysés dans cette étude ont la même hauteur et deux épaisseurs de lame d'air différentes, l'influence du rapport d'aspect est analysée en hauteur médiane pour deux journées ensoleillées et deux journées nuageuses.

La figure 3.46 illustre les fluctuations des vitesses et températures maximales en fonction du rapport d'aspect. Sur le graphique 3.46, sont représentés les valeurs maximales des vitesses et températures relevées dans le dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime et lame d'air mince $v_{mc,lam} \max$ et $T_{mc,lam} \max$ et celles du même dispositif avec lame d'air épaisse $v_{mc,lae} \max$ et $T_{mc,lae} \max$. Sont aussi représentées les valeurs de vitesses et températures maximales $v_{mf,lam} \max$ et $T_{mf,lam} \max$ mesurées dans le dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré avec lame d'air mince et celles relevées avec lame d'air épaisse $v_{mf,lae} \max$ et $T_{mf,lae} \max$. Les nombres (1), (2), (3) et (4) désignent les paramètres relevés pendant les journées ensoleillées et les nombres (1'), (2'), (3') et (4'), les journées nuageuses. Les points dont le rapport d'aspect (e/H) est égal à 0,019 désignent la lame d'air mince et ceux dont le rapport d'aspect vaut 0,043 désignent la lame d'air épaisse.

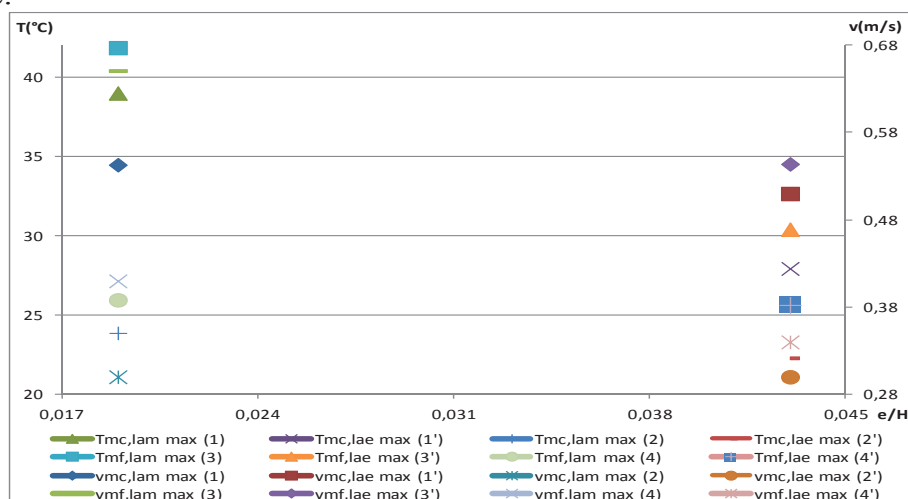


Figure 3.46 : Vitesses et températures maximales en rapport d'aspect d'hauteur médiane pour lames d'air mince et épaisse de deux journées ensoleillées et deux couvertes.

Nous pouvons constater que les températures et vitesses maximales des journées ensoleillées avec lame d'air mince sont supérieures à celles de la lame d'air épaisse. Nous pouvons noter aussi que les températures et vitesses de l'air sont plus élevées quand la plaque de parement est en aggloméré de pin maritime qui a une plus grande conductivité et une épaisseur plus petite. La structure convective est directement liée à la géométrie des parois latérales, la typologie des bardages et leurs caractéristiques thermiques. La modification des valeurs des vitesses mesurées suite au changement de la distance séparant la paroi absorbante et le mur isolant permet de constater l'importance de l'épaisseur de la lame d'air e sur le rapport d'aspect. L'effet des parois latérales apparaît beaucoup plus nettement quand notre lame d'air est mince.

Pour cause d'absence de rayonnement solaire, les vitesses et températures de l'air entre plaques des journées couvertes ont leurs valeurs maximales très basses par rapport aux journées ensoleillées.

Chapitre 4 : ANALYSES PHYSIQUES et MODELE

4.1 La modélisation globale du dispositif de bardage

La modélisation retenue pour décrire le comportement du bardage est des plus classiques. Trois éléments sont pris en compte :

- le parement extérieur qui est comme on l'a vu soumis aux contraintes extérieures que sont l'Eclairement solaire, la température ambiante et le vent et qui ensuite interagit au travers d'une part d'un échange convectif avec la lame d'air (le second élément) et, d'autre part d'un échange radiatif avec le mur support (le troisième élément) ;

- la lame d'air circulante ou non (peu) circulante qui s'échauffe au contact des parois solides et dont la vitesse en situation circulante est évaluée en utilisant les relations utilisées dans la réflexion expérimentale ;

- le mur support, pris de façon globale, qui interagit avec la lame d'air et le parement mais aussi sur son autre face avec l'ambiance intérieure dont on souhaite « maîtriser » la température.

Deux directions d'espace sont suffisantes et nous nous intéresserons particulièrement aux points pour lesquels nous disposons de mesures expérimentales que nous suivrons au cours du temps.

Parement extérieur :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \left(\frac{\rho C_p}{\lambda} \right)_{\text{parement}} \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

Avec comme condition initiale $T(x, z, 0) = T_{0, \text{parement}}(x, z)$

Deux conditions aux limites sont nécessaires suivant x :

$$\text{Sur la face extérieure} - \lambda_{\text{parement}} \frac{\partial T}{\partial x_{be}} = h_{\text{vent}}(T_{be} - T_{\text{amb}}) + \alpha E + \sigma \varepsilon (T_{be}^4 - T_{\text{ciel}}^4) \quad (4.1)$$

$$\text{Sur la face intérieure} - \lambda_{\text{parement}} \frac{\partial T}{\partial x_{bi}} = h_{\text{la}}(T_{bi} - T_{\text{la}}) + F_{bi-me} \sigma (T_{bi}^4 - T_{me}^4) \quad (4.2)$$

Mur Support :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \left(\frac{\rho C_p}{\lambda} \right)_{support} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4.3)$$

Avec comme condition initiale $T(x, z, 0) = T_{0,mur}(x, z)$

Le mur support (schématisé sur la figure 4.1) est constitué de plusieurs couches de matériaux différents qui ont des propriétés physiques différentes, en particulier, la capacité thermique massique, la masse volumique et la conductivité thermique.

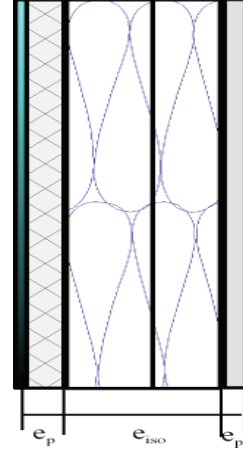


Figure 4.1 Schéma du mur support

En régime permanent, le flux de chaleur se conserve lors de la traversée du mur et s'écrit :

$$\varphi = h_{cv}S(T_{la} - T_{me}) = \frac{\lambda_p S(T_{me} - T_{ise})}{e_p} = \frac{\lambda_{iso} S(T_{ise} - T_{isi})}{e_{iso}} = \frac{\lambda_{pl} S(T_{isi} - T_{mi})}{e_{pl}} = h_{zone}S(T_{mi} - T_{zone}) \quad (4.4)$$

$$\text{D'où : } \varphi = \frac{T_{la} - T_{zone}}{\frac{1}{h_{cv}S} + \frac{e_p}{\lambda_p S} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso} S} + \frac{e_{pl}}{\lambda_{pl} S} + \frac{1}{h_{zone}S}} \quad (4.5)$$

La résistance thermique totale est égale à la somme des résistances

$$R_T = \frac{1}{h_{cv}S} + \frac{e_p}{\lambda_p S} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso} S} + \frac{e_{pl}}{\lambda_{pl} S} + \frac{1}{h_{zone}S} \Rightarrow \varphi = \frac{T_{la} - T_{zone}}{R_T} \quad (4.6)$$

Deux conditions aux limites sont nécessaires suivant x :

Sur la face extérieure donnant dans la lame d'air

$$-\lambda_{support} \frac{\partial T}{\partial x_{me}} = h_{cv}(T_{me} - T_{la}) + F_{me-bi}\sigma(T_{me}^4 - T_{bi}^4) \quad (4.7)$$

Sur la face intérieure donnant dans l'habitable

$$-\lambda_{support} \frac{\partial T}{\partial x_{mi}} = h_{zone}(T_{mi} - T_{zone}) \quad (4.8)$$

Pour ces deux éléments les deux conditions aux limites en $z=0$ ou H sont du même type :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{0,H} = 0 \quad (4.9)$$

Lame d'air :

$$\lambda_{la} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - (\rho C_p)_{la} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.10)$$

La vitesse de l'air v est supposée ne pas avoir de composante dans la direction x et elle sera utilisée dans la validation du modèle par les résultats expérimentaux dans les corrélations (4.21) et (4.22).

$$\text{Avec comme condition initiale } T(x, z, 0) = T_{0, \text{ambiante}}(x, z) \quad (4.11)$$

Pour les conditions aux limites en x il suffit de raccorder les flux en surface en considérant une continuité de température.

$$\text{Côté parement extérieur} \quad -\lambda_{parement} \frac{\partial T}{\partial x_{bi}} = -\lambda_{air} \frac{\partial T}{\partial x_{be}} \quad (4.12)$$

$$\text{Côté mur support} \quad -\lambda_{sup port} \frac{\partial T}{\partial x_{me}} = -\lambda_{air} \frac{\partial T}{\partial x_{mi}} \quad (4.13)$$

Et donc les termes $-\lambda_{air} \frac{\partial T}{\partial x_{be}}$ et $-\lambda_{air} \frac{\partial T}{\partial x_{mi}}$ expriment les flux convectifs tels qu'écris pour les deux surfaces solides.

Cette modélisation servira pour décrire la situation de lame d'air circulante ou non circulante

4.2 Compléments d'analyse

4.2.1 Flux thermiques entre plaques

La chaleur transférée en W/m^2 de surface de paroi d'échange vers l'écoulement d'air ascendant sous convection naturelle entre la plaque de parement et le mur isolant est corrélée en termes de température moyenne et de température de l'air à l'entrée, Ong [2003] et l'on retient la relation suivante :

$$\Phi_{la} = \frac{\dot{m} C_p (T_{ref,f} - T_{b,la})}{\gamma e H} \quad (4.14)$$

$$\text{la température moyenne du fluide étant calculée à partir de : } T_{ref,f} = \gamma T_{mla} + (1 - \gamma) T_{bla} \quad (4.15)$$

Où γ est une constante permettant d'approcher la température moyenne en influant sur telle ou telle contribution $\gamma = 0,75$ sera utilisée pour tous les calculs.

4.2.1.1 Lame d'air ventilée

A partir des mesures des températures des surfaces internes de la plaque de parement et externe du mur isolant, par la corrélation 4.14, nous déduisons le flux de chaleur total non évacué par le mouvement ascendant de l'air dans le canal entre plaques.

Nous présentons les résultats pour les journées ensoleillées type. La figure 4.2 illustre l'évolution journalière du flux thermique global pour les lames d'air mince et épaisse pour les configurations de lame d'air ouverte mince et épaisse. Les émissivités ε des surfaces valent : pin maritime 0,84 ; l'aggloméré du pin 0,96 et la plaque du plâtre 0,9.

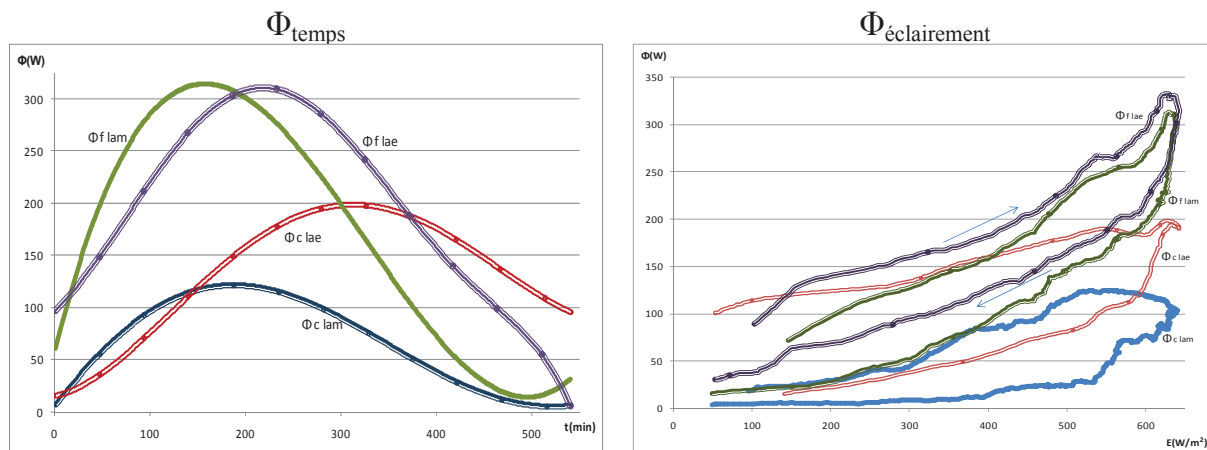


Figure 4.2 : Evolution versus le temps (Φ_{temps}) et versus l'éclairement ($\Phi_{\text{éclairement}}$) du flux thermique global le long des lames d'air ouvertes minces et épaisses des dispositifs de bardage avec plaques de parement en pin maritime et en aggloméré pour les journées ensoleillées du 20/07/10 et 05/08/10.

La figure 4.2 nous permet de constater que la courbe $\Phi_{c, \text{lam}}$ illustrant le flux total dans la lame d'air mince avec plaque de parement en pin maritime retient moins de flux thermique que les autres configurations puisque la valeur maximale du flux thermique est de 120W. La courbe $\Phi_{c, \text{lae}}$ qui illustre le flux thermique total dans la lame d'air ouverte épaisse et plaque de parement évacue moins de chaleur que la lame d'air mince puisque le flux thermique susceptible d'être transmis au mur isolant atteint une valeur maximale de 200W. Les courbes $\Phi_{f, \text{lam}}$ et $\Phi_{f, \text{lae}}$ qui représentent les flux thermiques dans les lames d'air mince et épaisse du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré du pin, atteignent les valeurs les plus élevées du flux thermique, à savoir 311 et 340W respectivement donc, dans cette configuration, la lame d'air épaisse évacue légèrement moins bien que la lame d'air mince.

Les flèches sur la figure 4.2 ($\Phi_{\text{éclairement}}$) indiquent le sens de l'évolution des flux thermiques en fonction de l'éclairement et celles-ci nous permettent de constater que la courbe $\Phi_{c, \text{lam}}$ atteint ses valeurs maximales plus tôt que la courbe $\Phi_{c, \text{lae}}$. Donc, il y a un décalage entre les valeurs maximales du flux thermique dans les lames d'air mince et

épaisse avec plaque de parement en pin maritime et moins de chaleur évacuée et ceci dû au changement d'épaisseur de la lame d'air.

Nous constatons aussi que l'écart entre les phases de croissance et de décroissance des flux dans la lame d'air mince avec plaque de parement en pin maritime représentée par la courbe $\Phi_{c\ lam}$ est moindre que celui de la courbe $\Phi_{c\ lae}$ donc, dans cette configuration, l'augmentation de l'écart entre plaques augmente l'inertie entre plaques. Ces phénomènes ne sont pas observés sur les courbes $\Phi_{f\ lam}$ et $\Phi_{f\ lae}$ qui symbolisent les flux thermiques dans les lames d'air mince et épaisse avec plaque de parement en aggloméré puisque cette plaque a moins d'inertie thermique et les distances sont telles que le flux thermique non évacué reste plus élevé que celui des dispositifs de bardage avec plaque de parement en pin maritime.

4.2.1.2 Lame d'air non ventilée

Avant de présenter quelques résultats, la figure ci-contre présente la configuration « lame d'air non circulante » obtenue par la fermeture des clapets 1 et 2 sis à la sortie et à l'entrée de la lame d'air. Celle-ci accumulera alors de la chaleur et l'on considère ici une masse d'air piégée.

A partir des mesures des températures des surfaces internes de la plaque de parement et externe du mur isolant, à l'aide de la corrélation 4.14, nous déduisons le flux de chaleur total stocké par l'air dans le canal entre plaques.

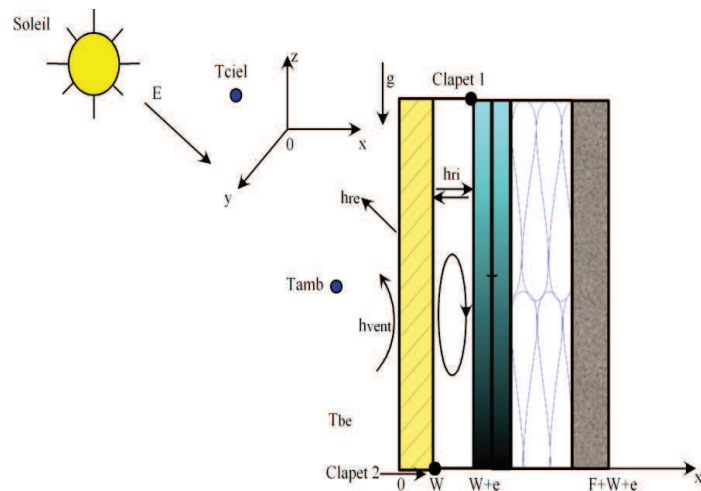


Figure : 4.3 Dispositif de bardage en configuration de lame d'air non circulante

Nous présentons les résultats pour les journées ensoleillées type. La figure 4.4 illustre l'évolution journalière du flux thermique global pour les lames d'air mince et épaisse pour les configurations de lame d'air fermée mince et épaisse.

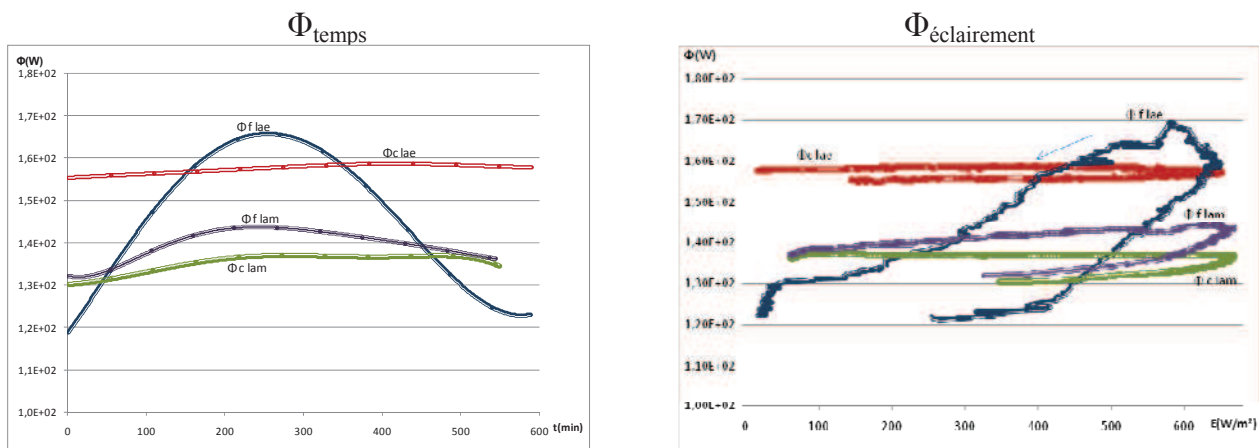


Figure 4.4 : Evolution versus le temps (Φ_{temps}) et versus l'éclairement ($\Phi_{\text{éclairement}}$) du flux thermique global le long des lames d'air fermées minces et épaisses des dispositifs de bardage avec plaques de parement en pin maritime et en aggloméré pour les journées ensoleillées du 24/03/11 et 09/04/11.

La figure 4.4 nous permet de constater que la courbe $\Phi_{c, \text{lam}}$ illustrant le flux total dans la lame d'air mince fermée avec plaque de parement en pin maritime accumule moins de flux thermique que les autres configurations puisque la valeur maximale du flux thermique atteinte pendant la journée est de 137W. La courbe $\Phi_{c, \text{lae}}$ qui illustre le flux thermique total dans la lame d'air fermée épaisse et plaque de parement en pin maritime retient plus de chaleur que la lame d'air mince puisque le flux thermique susceptible d'être transmis au mur isolant atteint une valeur maximale de 159W. La courbe $\Phi_{f, \text{lam}}$ qui représente le flux thermique dans la lame d'air mince du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré du pin atteint des valeurs intermédiaires entre $\Phi_{c, \text{lam}}$ et $\Phi_{c, \text{lae}}$. La courbe $\Phi_{f, \text{lae}}$ qui représente le flux thermique dans la lame d'air épaisse du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré du pin, atteint les valeurs les plus élevées du flux thermique, à savoir 170W.

La flèche sur la figure 4.4 ($\Phi_{\text{éclairement}}$) indique le sens de l'évolution des flux thermiques en fonction de l'éclairement et celles-ci nous permettent de constater que les courbes $\Phi_{c, \text{lam}}$ et $\Phi_{c, \text{lae}}$ ont un petit écart entre les valeurs minimales et maximales. Donc, la plaque de parement en pin maritime permet d'accumuler un flux thermique presque constant. Par contre, les courbes $\Phi_{f, \text{lam}}$ et $\Phi_{c, \text{lae}}$ ont un écart plus prononcé entre les valeurs minimales et maximales du flux thermique. Par conséquent, ces courbes ont des phases de croissance et de décroissance des flux dans la cavité fermée et les valeurs maximales sont atteintes après les valeurs maximales de l'éclairement solaire.

Donc, le flux maximal est obtenu au sein de la cavité fermée épaisse avec plaque de parement en aggloméré et ceci nous permet de constater que cette plaque de parement est sensible aux échanges thermiques entre l'extérieur ambiant et l'intérieur de la cavité.

4.2.2 Caractéristiques générales de l'écoulement et des transferts thermiques

4.2.2.1 Lame d'air ventilée

Les résultats présentés sur la figure 4.5 ci-dessous illustrent la relation entre le nombre de Rayleigh et le nombre de Nusselt et ce à partir de la corrélation retenue, Ramadan [2008], rappelée dans le tableau 4.1.

Nombre de Rayleigh	$Ra = Gr \times Pr = \left[\frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu^2} \right] \frac{\mu C_p}{\lambda}$ (4.16)
Nombre de Nusselt	$Nu = 0,68 + (0,67 Ra^{1/4}) / [1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{4/9}$ (4.17)
Coefficient d'expansion	$\beta = 1/T_f$ (4.18)
Terme moteur de la convection	$\Delta T = T_{bi} - T_{me}$ (4.19)

Tableau 4.1 : Les grandeurs adimensionnelles pertinentes

Cette courbe est liée aux géométries et parements étudiés.

Les résultats présentés sur la figure 4.5 illustrent que même s'il existe des différences de comportement dynamique et thermique entre les diverses configurations géométriques étudiées, les grandeurs les plus significatives (nombre de Rayleigh caractérisant l'écoulement et le nombre de Nusselt caractérisant les transferts thermiques) évoluent l'une par rapport à l'autre en fonction de la même relation quantifiée par la corrélation (4.17) (voir tableau 4.1).

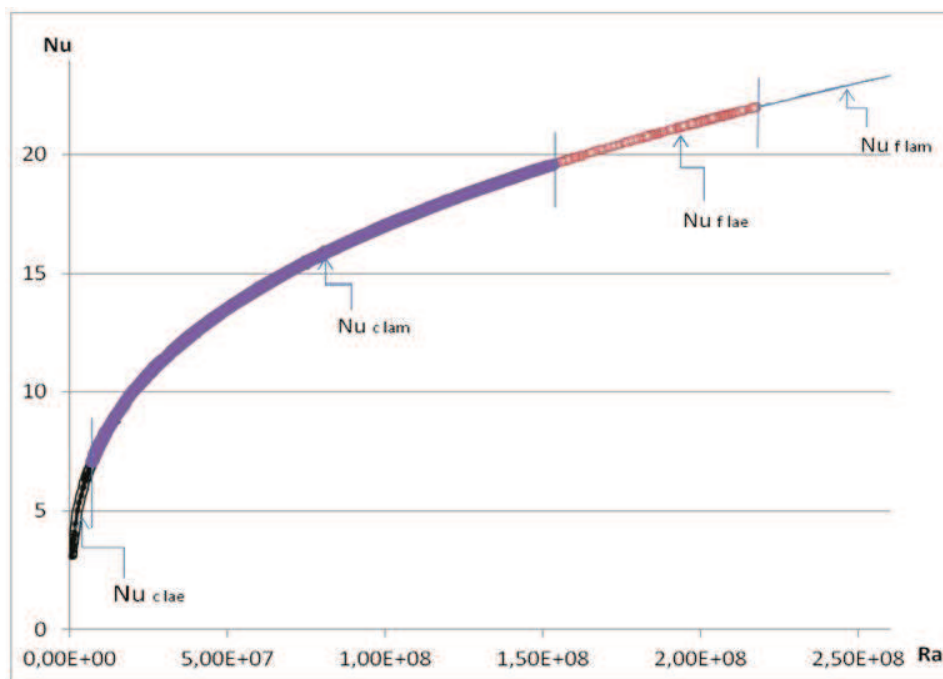


Figure 4.5: Relation entre le nombre de Rayleigh et le nombre de Nusselt (Nu) pour les dispositifs de bardage des lames d'air mince et épaisse ventilées avec plaques de parement en pin maritime et aggloméré de pin (20/07/10 et 05/08/10).

Le changement d'épaisseur de la lame d'air et de la plaque de parement fait varier les valeurs numériques des écoulements entre plaques et des transferts thermiques et ceci entraîne une variation des zones d'activité de la relation entre les nombres de Nusselt et de Rayleigh, telles que illustrées sur la figure 4.5. La zone $Nu_{c\ lae}$ correspond à la plaque de parement en pin maritime et lame d'air épaisse et $Nu_{c\ lam}$ correspond à la même plaque et lame d'air mince.

Les échanges thermiques étant plus forts dans le dispositif avec plaque de parement en aggloméré, la relation entre les écoulements et les transferts thermiques est plus forte. Les zones d'activité $Nu_{f\ lam}$ et $Nu_{f\ lae}$ qui représentent cette relation dans les lames d'air mince et épaisse avec plaque de parement en aggloméré de pin respectivement illustrent cette relation.

4.2.2.2 Lame d'air non ventilée

Les résultats présentés sur la figure 4.6 ci-dessous illustrent la relation entre le nombre de Rayleigh et le nombre de Nusselt et ce à partir de la corrélation (4.17) retenue (tableau 4.1) corrigée du rapport d'aspect e/H . Cette courbe est liée aux parements étudiés.

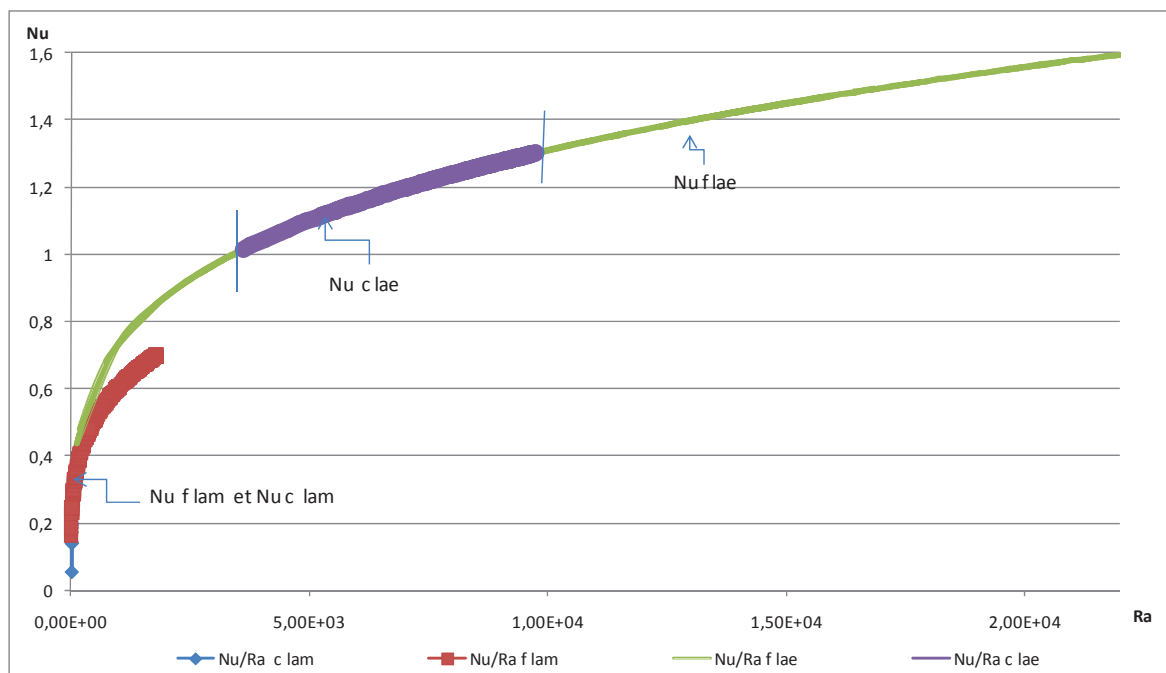


Figure 4.6: Relation entre le nombre de Rayleigh et le nombre de Nusselt (Nu) pour les dispositifs de bardage des lames d'air mince et épaisse non ventilées avec plaques de parement en pin maritime et aggloméré de pin (24/03/11 et 09/04/11).

La figure 4.6 illustre la quantification des écoulements entre plaques et des transferts thermiques en fonction de l'épaisseur de la cavité fermée mince $e/H = 0,019$ permet d'obtenir les valeurs du nombre de Rayleigh $3,3 \times 10^2 \leq Ra \leq 1,5 \times 10^3$ pour les deux plaques de parement et ceci est illustré par les courbes $Nu_{f\ lam}$ et $Nu_{c\ lam}$ et pour la cavité fermée

épaisse $e/H = 0,043$, le nombre de Rayleigh évolue dans l'intervalle $3,5 \times 10^3 \leq Ra \leq 9,6 \times 10^3$ pour la plaque de parement en pin maritime et $1,26 \times 10^2 \leq Ra \leq 9,6 \times 10^4$ pour la plaque de parement en aggloméré. Ces résultats montrent que le nombre de Nusselt évolue dans l'intervalle $0,05 \leq Nu \leq 1,6$. Ces valeurs faibles du nombre de Nusselt montrent que le transfert de chaleur s'effectue surtout en « régime de conduction », d'après Xamán et al.[2005] dans une cellule de recirculation stable pour toute la cavité. Pour $Ra \leq 10^5$, Eckert et Carlson (cités par Jannot et Mazeas [1973]) montrent que la température se stratifie dans le cœur de la cavité et ceci confirme la répartition de températures obtenue expérimentalement et illustrée sur les figures 3.31 et 3.32.

4.2.3 Les vitesses de l'air entre plaques

Le calcul des valeurs physiques concrètes de prédiction des performances des systèmes de bardage analysés dans cette étude, s'est appuyé sur les mesures des paramètres et parmi lesquels, la vitesse de l'air entre plaques. Pour valider notre modèle physique, les vitesses théoriques ont été calculées et comparées aux différentes vitesses mesurées et ceci pour une lame d'air donnée.

La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du canal entre plaques génère un gradient de densité qui induit à son tour un mouvement naturel ascendant d'air. En considérant que la densité de l'air à l'extérieur est très proche de celle de l'intérieur, le débit massique d'air dans le canal est obtenu d'après Ong[2003], par la relation :

$$\dot{m} = C_d \frac{\rho_f A_0}{\sqrt{1 + A_r}} \sqrt{\frac{2gH(T_{ref,f} - T_{b,la})}{T_{b,la}}} \quad \text{Kg/s} \quad (4.20)$$

C_d est le coefficient de décharge qui prend en considération l'énergie cinétique, la distribution de la vitesse dans la section de passage, la contraction du flux du fluide et la rugosité des surfaces et il dépend de la géométrie du conduit et du nombre de Rayleigh qui caractérise la nature du régime de l'écoulement. La température moyenne du fluide $T_{ref,f}$ est calculée à partir de la formule présentée précédemment.

La vitesse de l'air ascendant sous convection naturelle dans la lame d'air entre la plaque de parement et le mur isolant peut être calculée à travers le débit d'air en utilisant les relations suivantes :

$$v_1 = C_d \frac{A_0}{\sqrt{1 + A_r}} \sqrt{\frac{2gH(T_{ref,f} - T_{b,la})}{T_{b,la}}} \quad \text{m/s} \quad (4.21)$$

La valeur recommandée de C_d est 0,6 en accord avec Flourentzou [1998] et elle sera utilisée pour les calculs.

Un bilan simple faisant intervenir la différence de pressions due à l'écart de masse volumique entre l'air extérieur et celui dans le canal (à la même hauteur) et la perte de charge due aux frottements dans le canal conduit à :

$$v_2 = \sqrt{\frac{2D_{hy}g}{C_d} \left[\frac{T_{r,f} - T_{amb}}{T_{amb}} \right]} \quad \text{m/s} \quad (4.22)$$

Avec ici $T_{r,f} = \gamma T_{bi} + (1 - \gamma) T_{me}$ (4.23)

et le diamètre hydraulique $D_{hy} = 2e$.

Où γ est la constante d'approximation de la température moyenne $\gamma = 0,75$ utilisée pour tous les calculs.

Dans ce cas C_d évolue entre 0,3 et 0,6. La valeur 0,6 sera la aussi utilisée pour les calculs.

Les courbes v_1 et v_2 représentent les vitesses calculées d'après les équations précédentes. Les points A et B désignent le début et la fin de l'évolution des vitesses. Ceci est vrai pour les figures allant de 4.7 à 4.10.

La figure 4.7 illustre les vitesses mesurées et calculées dans les dispositifs de bardage avec plaque de parement en pin maritime et lame d'air mince. La courbe $v_{mc,lam}$ représente la vitesse mesurée dans le lame d'air.

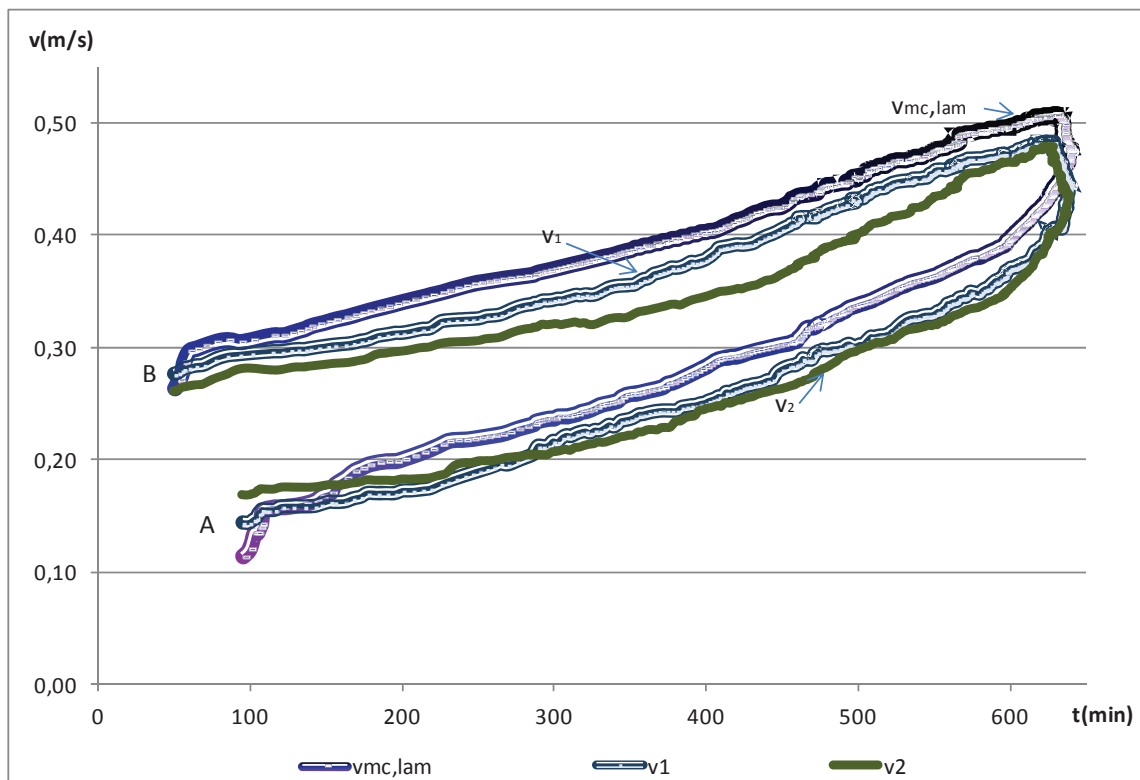


Figure 4.7 : Evolution des vitesses calculées et mesurée dans la lame d'air mince avec plaque de parement en pin maritime de la journée estivale ensoleillée du 20/07/10

L'évolution des vitesses calculées de l'air v_1 et v_2 dans le dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime est très proche de celle de la vitesse mesurée $v_{mf,lam}$ mais elles n'atteignent pas les valeurs maximales de cette dernière et ceci est dû à la non prise en considération de l'inertie thermique par les corrélations utilisées pour le calcul des vitesses.

Les vitesses v_1 et v_2 calculées d'après les équations précédemment définies montrent que la vitesse d'air entre plaques est influencée par la différence de pression entre l'entrée et la sortie (v_1) ou entre l'extérieur ambiant et la lame d'air (v_2), causée par la différence de température de l'air qui génère une différence de densité et par conséquent, une différence de pression entre l'extérieur ambiant et l'intérieur de la lame d'air. Quand la température à l'intérieur de la lame d'air est supérieure à celle de l'extérieur ambiant, l'air s'écoule vers l'intérieur à partir de l'entrée au dessous du niveau de pression neutre, Flourentzou *et al.* [1998], et vers l'extérieur par l'ouverture située au dessus de ce niveau de pression neutre. Le niveau de pression neutre est la hauteur à laquelle la pression de l'extérieur ambiant et celle de l'intérieur de la lame d'air sont égales. Dans le cas de la lame d'air de cette étude, le niveau de pression neutre se situe en hauteur médiane et est la hauteur de référence pour la mesure de la vitesse de l'air entre plaques.

La figure 4.8 illustre les vitesses mesurées et calculées dans le dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré du pin et lame d'air mince. La courbe $v_{mf,lam}$ représente la vitesse mesurée dans la lame d'air.

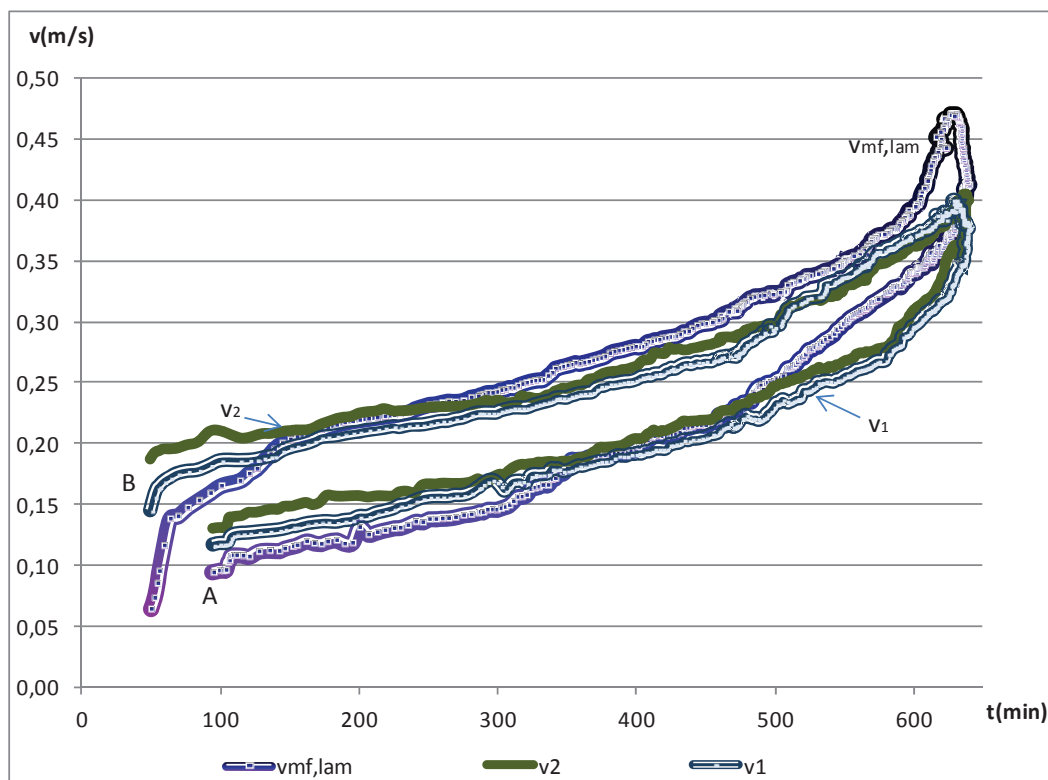


Figure 4.8 : Evolution des vitesses mesurée et calculées dans la lame d'air mince avec plaque de parement en aggloméré de la journée estivale ensoleillée du 20/07/10

La figure 4.8 illustre la proximité des valeurs entre les vitesses mesurées et calculées. Les points A et B symbolisent le début et la fin de l'évolution des vitesses. Ceci nous montre que les vitesses calculées dans le dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré du pin et lame d'air mince, suivent de près les vitesses mesurées. Donc, dans cette configuration, les vitesses calculées v_1 et v_2 n'atteignent pas la valeur maximale atteinte par la vitesse mesurée $v_{mf,lae}$ puisque dans leur quantification, l'inertie thermique n'est pas prise en compte. Le débit massique de l'air entre plaques est dérivé à partir de la vitesse de l'air entre plaques et dans cette configuration, les vitesses mesurées et calculées permettent de retrouver le débit massique de l'air évacué.

La figure 4.9 illustre les vitesses mesurées et calculées dans les dispositifs de bardage avec lame d'air épaisse et plaque de parement en pin maritime. La courbe $v_{mc,lae}$ représente les vitesses mesurées dans la lame d'air épaisse.

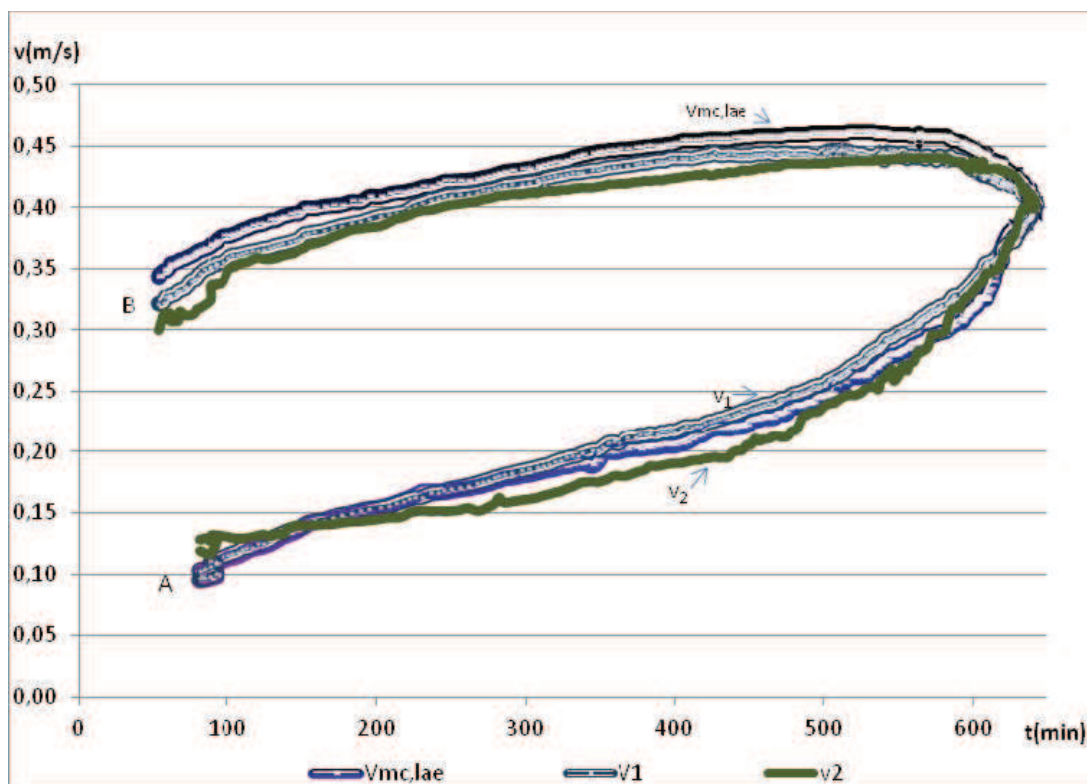


Figure 4.9 : Evolution des vitesses mesurée et calculées dans la lame d'air épaisse avec plaques de parement en pin maritime de la journée estivale ensoleillée du 05/08/10

La figure 4.9 illustre la proximité des valeurs entre les vitesses mesurées et calculées. Les points A et B symbolisent le début et la fin de l'évolution des vitesses. Cette figure nous montre qu'en changeant l'écartement de la lame d'air, les vitesses calculées réagissent identiquement que les vitesses mesurées. Donc, dans la configuration du dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime, le changement d'épaisseur de la lame d'air a une influence sur l'inertie thermique, la différence de températures entre la surface interne sur les échanges thermiques. Le changement de l'écartement entre la plaque de parement et le mur isolant modifie les échanges thermiques entre plaques et ceci modifie le rapport entre les températures à l'extérieur ambiant et à l'intérieur de la lame d'air.

Les valeurs maximales des vitesses calculées v_1 et v_2 sont légèrement inférieures aux valeurs maximales de la vitesse mesurée $v_{mf,lae}$.

La figure 4.10 illustre les vitesses mesurées et calculées dans les dispositifs de bardage avec plaque de parement en aggloméré et lame d'air épaisse. La courbe $v_{mf,lae}$ représente la vitesse mesurée dans la lame d'air épaisse.

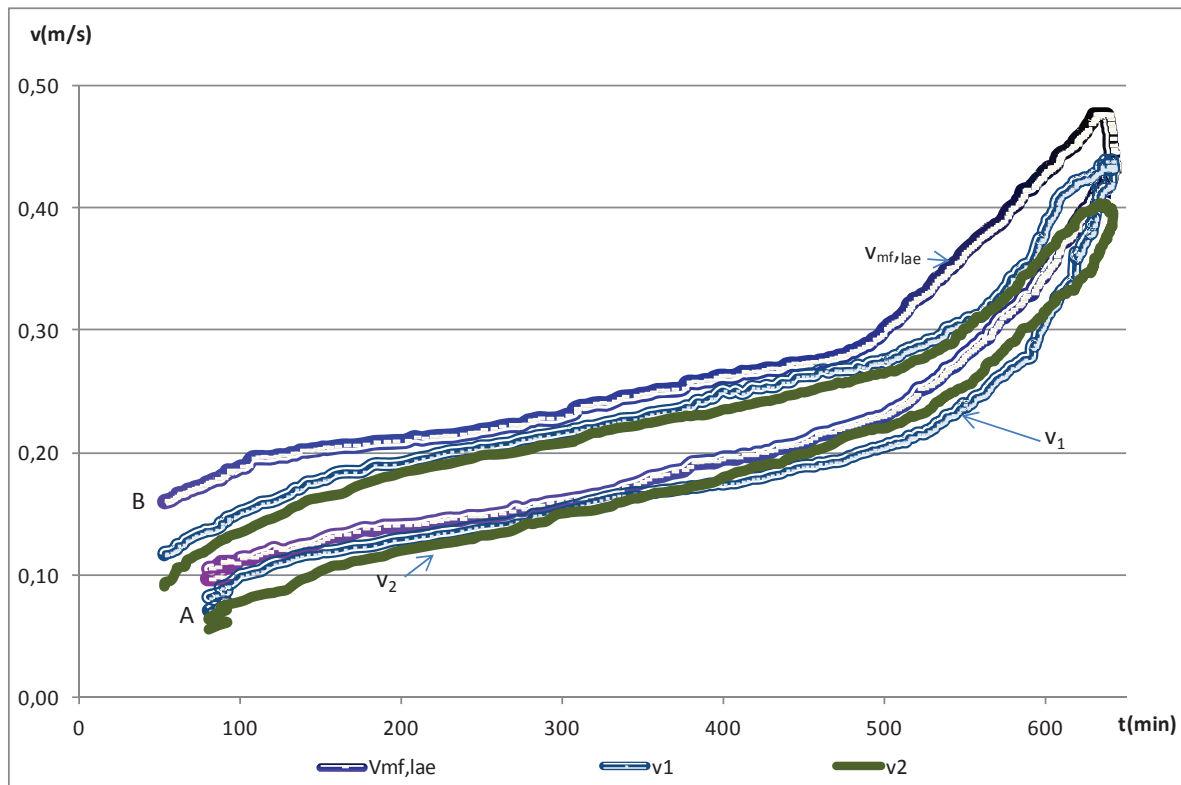


Figure 4.10 : Evolution des vitesses mesurée et calculées dans la lame d'air épaisse avec plaque de parement en aggloméré de la journée estivale ensoleillée du 05/08/10

Sur la figure 4.10 la proximité des valeurs entre les vitesses mesurées et calculées est illustrée. Les points A et B symbolisent le début et la fin de l'évolution des vitesses dans la lame d'air. Ceci nous montre qu'en changeant l'écartement de la lame d'air, les vitesses calculées et mesurées ont le même écart entre le début et la fin de l'évolution qui reste très proche de celui de ce même dispositif avec lame d'air mince (figure 4.8). Donc, dans cette configuration du dispositif de bardage, le changement d'épaisseur de la lame d'air n'a pas d'influence sur les échanges thermiques dans le canal entre plaques, les flux thermiques sont tellement élevés qu'il faudrait agrandir beaucoup plus la lame d'air pour pouvoir influencer les écoulements au sein de celle-ci.

La confrontation entre les vitesses mesurées et calculées telles que illustrées sur les figures 4.7 à 4.10, nous permet de constater que l'élément moteur de la vitesse de l'air dans le canal entre plaques est la différence de pression hydrostatique entre l'extérieur et l'intérieur qui est fonction de la différence de températures entre l'extérieur et l'intérieur. L'obtention des valeurs très proches des vitesses mesurées et calculées dans chaque configuration du dispositif de bardage, nous réconforte dans nos choix d'instrumentation

expérimentale et notamment, la mesure de vitesses en hauteur médiane qui correspond au niveau de pression neutre et qui est la hauteur à laquelle les pressions extérieure et intérieure sont égales. La hauteur médiane est le niveau de pression neutre de référence pour les cavités Flourentzou [1998], avec deux sections ouvertes surtout quand les sections ouvertes se situent loin du niveau de pression neutre et c'est le cas des dispositifs objets de cette étude. Le choix de corrélations des calculs numériques des vitesses est aussi judicieux puisque la vitesse de l'air entre plaques est basée sur l'équilibre entre la poussée et le frottement et lorsque l'on est en présence de frottements, le théorème de Bernoulli ne s'applique plus et la charge n'est plus constante. On parle alors de perte de charge. On utilise dans ce cas, le théorème de Bernoulli généralisé. Ceci s'applique que dans le cas de conduite verticale.

Les vitesses calculées en fonction de la différence de températures entre la lame d'air et la température ambiante confirment que la vitesse de l'air dans le canal entre plaques est directement liée aux températures de la surface intérieure de la plaque de parement et de la surface extérieure du mur isolant. Les résultats montrent que les résultats des calculs sont proches des valeurs mesurées et ceci donne de la validité à notre modèle.

4.2.4 Rendement des dispositifs de bardage

Les phénomènes thermophysiques qui se déroulent dans le dispositif de bardage dépendent de l'éclairement et de la température ambiante donc, son rendement η rapporté à l'écart de température entre la sortie et l'entrée peut être défini d'après la corrélation:

$$\eta = \dot{m}C_p \frac{(T_{h,la} - T_{b,la})}{E} \quad (4.24)$$

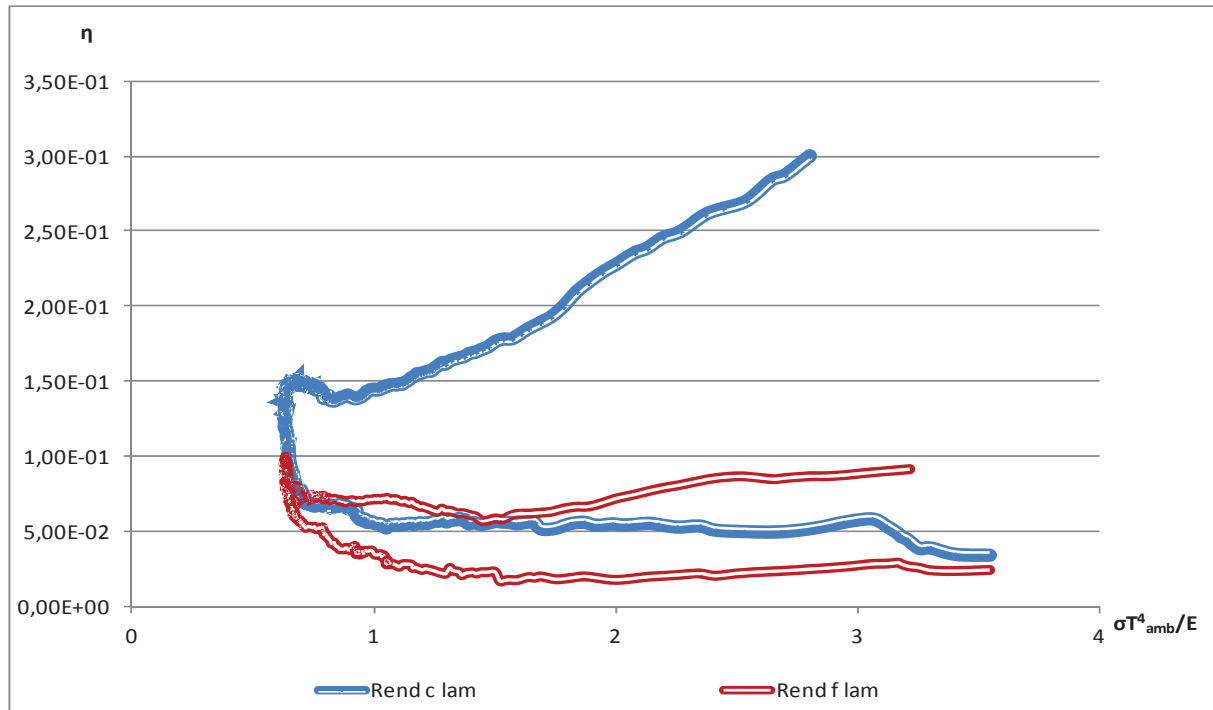


Figure 4.11 : Evolution du rendement propre des dispositifs de bardage avec plaques de parement en pin maritime et en aggloméré du pin et lame d'air mince (rapporté au ΔT entrée sortie) en fonction de l'inverse de son éclairement.

La figure 4.11 illustre les rendements propres des dispositifs de bardage avec lame d'air mince qui nous montrent qu'au début de la réception de l'énergie incidente, le rendement du dispositif de bardage décroît et commence à croître en même temps qu'il y a plus d'énergie à évacuer pendant les heures centrales de la journée et à partir de ce moment, le rendement atteint les valeurs maximales en fin de journée.

La valeur maximale du rendement pour la plaque en aggloméré est de 10% et pour la plaque de parement en pin maritime est de 30%.

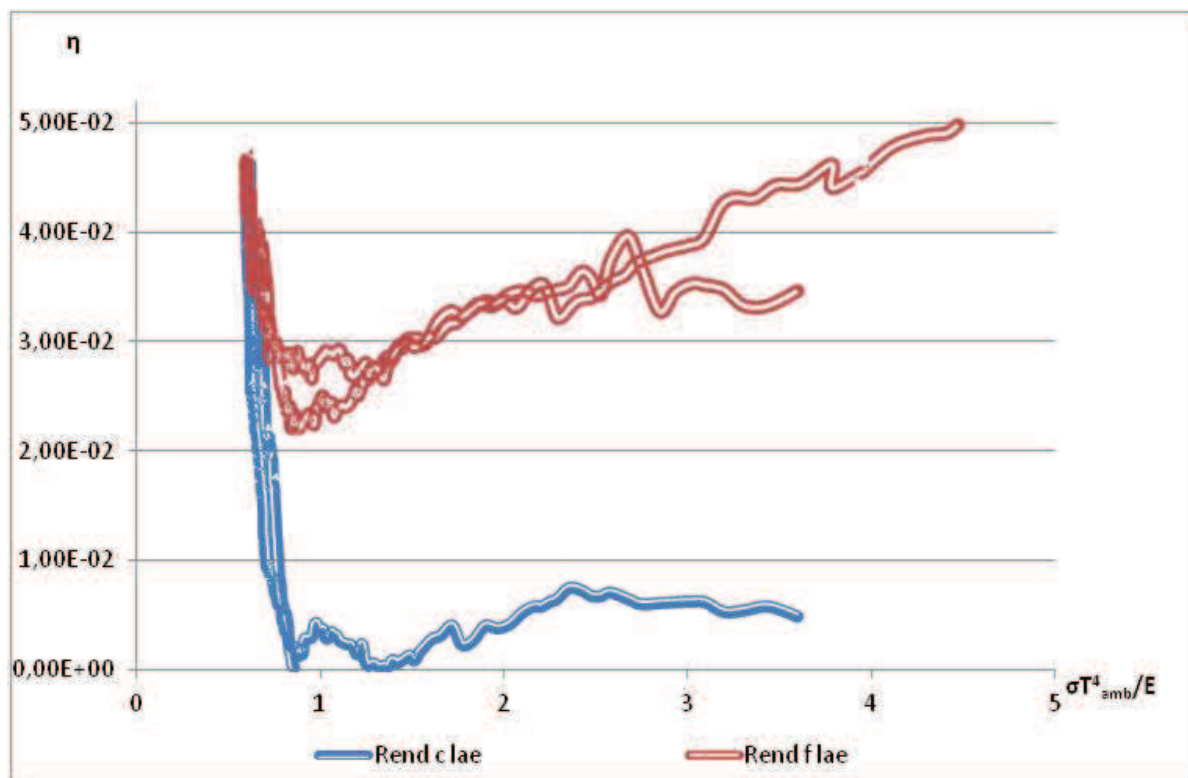


Figure 4.12 : Evolution du rendement propre des dispositifs de bardage avec plaques de parement en pin maritime et en aggloméré du pin et lame d'air épaisse (rapporté au ΔT entrée-sortie) en fonction de l'inverse de son éclairement.

La figure 4.12 illustre les rendements propres des dispositifs de bardage avec lame d'air épaisse qui commencent à décroître au début de la journée avec la réception de l'énergie solaire et pendant les heures centrales de la journée après une certaine augmentation, et à partir de ce moment l'évolution diffère en fonction de la plaque de parement puisque pour la plaque de parement en aggloméré, le rendement croît après une légère baisse, et pour la plaque de parement en pin maritime, le rendement chute pour atteindre ses valeurs minimales.

Les valeurs maximales atteintes par le dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime oscillent autour de 4,7% pendant les heures centrales de la

journée et le dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré atteint un rendement maximal de 5% en fin de journée.

4.3. Quelques simulations

Le modèle retenu pour décrire, de façon simplifiée, les différents transferts dans le bardage est celui décrit au paragraphe 4.1. Les simulations sont réalisées à l'aide de l'outil COMSOL. Les géométries et les éléments constructifs sont ceux présentés au chapitre 2 (figures 2.5 et 2.6). Quelques séquences ont été simulées permettant de s'assurer d'une certaine cohérence entre les résultats expérimentaux largement décrits par ailleurs et les résultats déduits des simulations.

Une journée type ensoleillée a été retenue pour les simulations, les deux entrées météorologiques que sont l'éclairement et la température ambiante sont proposées ci-dessous pour ce qui est de la vitesse du vent une valeur constante de 3 m/s a été considérée.

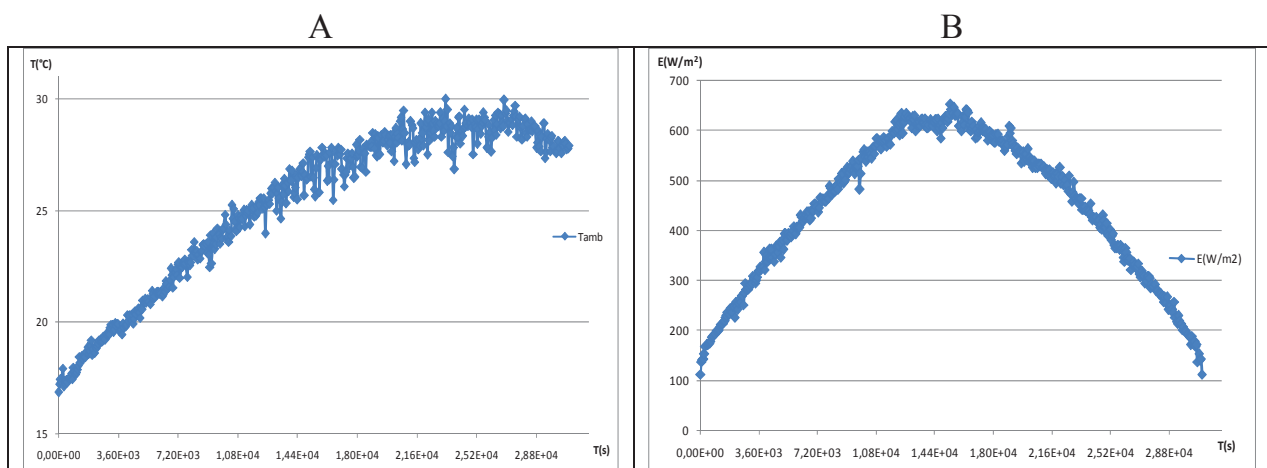


Figure 4.13 : Conditions météorologiques de la journée ensoleillée estivale du 06/08/2010 (séquence B). A) Température ambiante. B) Eclairement solaire.

4.3.1 Plaque de parement en pin maritime et lame d'air mince

La figure 4.14 présente l'évolution des profils de température au cours du temps. A un instant donné la décroissance progressive des températures est constatée depuis la face extérieure du parement jusqu'à la face extérieure du mur support, et ce en accord avec la résistance thermique de la plaque de parement en pin maritime et du mur isolant et de l'évacuation de l'air par le canal entre plaques. Ensuite en suivant, localement, l'évolution temporelle on note la cohérence avec la courbe d'éclairement et la pondération liée aux masses thermiques en jeu.

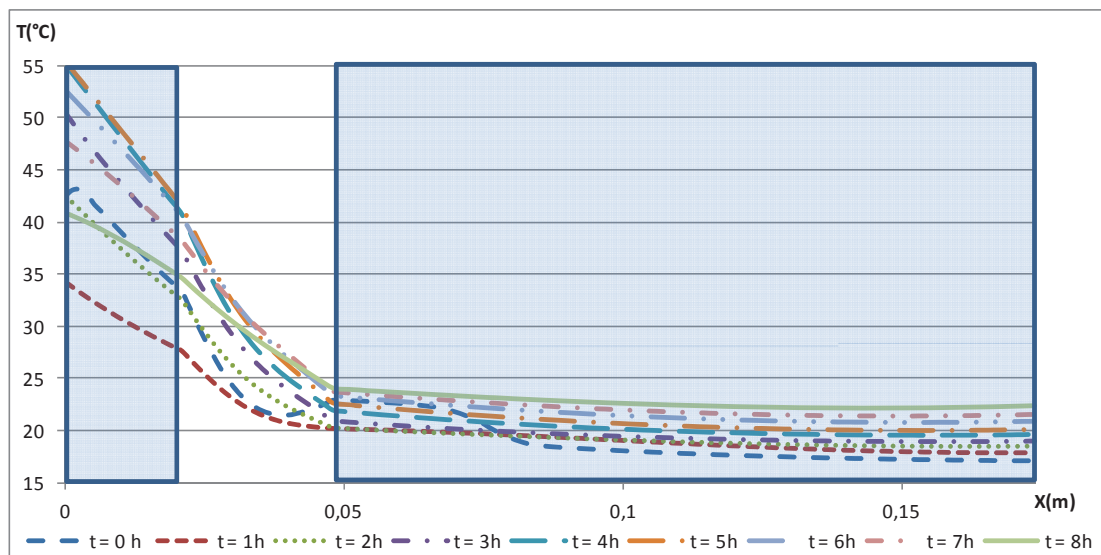


Figure 4.14 : Evolution simulée, au cours du temps, des profils de température à la cote de 1,4 m. Plaque de parement en pin maritime et la lame d'air mince

Un éclairage particulier est porté sur la lame d'air figure 4.15. La chaleur qui parvient à la surface intérieure de la plaque de parement est quasiment évacuée par la lame d'air et seulement une petite partie est transmise au mur support. Un gradient de température net est observé entre la face chaude (parement) et froide (mur support).

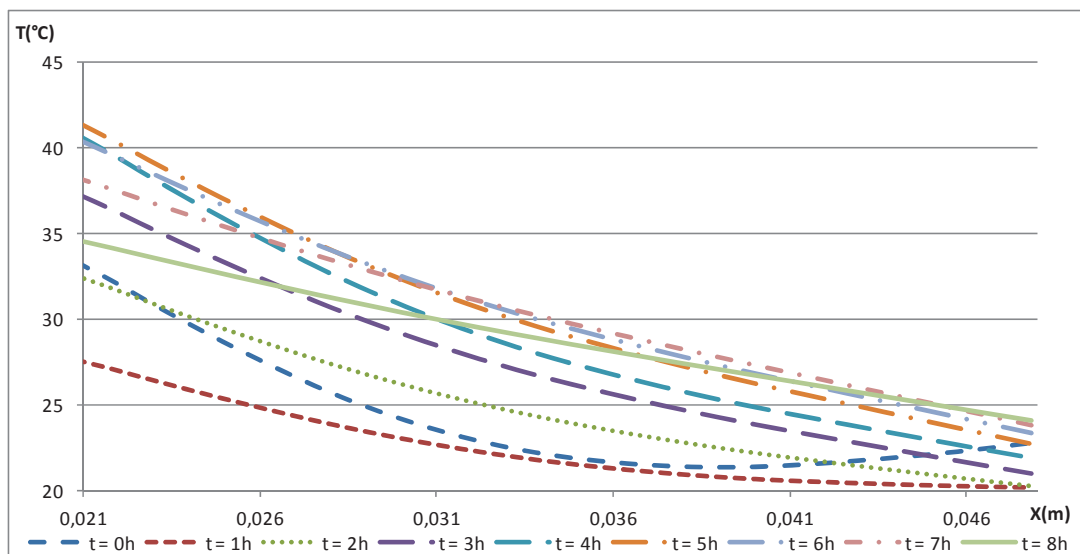


Figure 4.15 : Les profils de températures, au cours du temps, dans la lame d'air à la hauteur de 1,4 m. Plaque de parement en pin maritime et la lame d'air mince.

4.3.2 Plaque de parement en pin maritime et lame d'air épaisse

La figure 4.16 présente l'évolution des profils de température au cours du temps. Les comportements observés, à un instant donné, sont globalement similaires à ceux pour la configuration en lame mince. Une différence est notée quant à l'évolution temporelle, ceci sera repris plus avant.

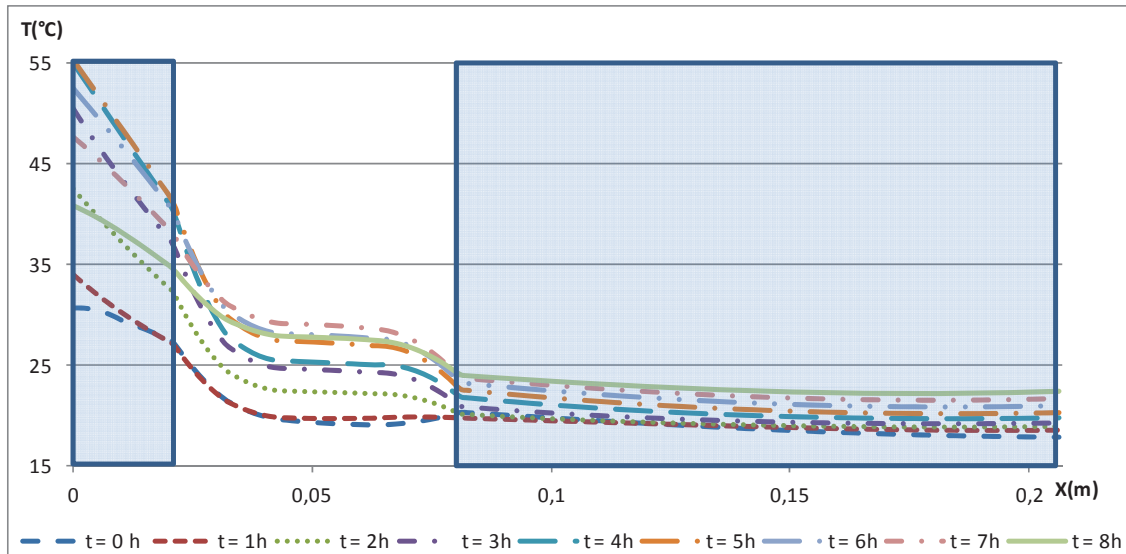


Figure 4.16 : Evolution simulée, au cours du temps, des profils de température à la cote de 1,4 m. Plaque de parement en pin maritime et la lame d'air épaisse.

Pour ce qui est de la lame d'air figure 4.17. La chaleur qui parvient à la surface intérieure de la plaque de parement est quasiment évacuée par la lame d'air et seulement une petite partie est transmise au mur support. Par contre on constate une baisse des niveaux de température qu'il convient alors de corrélérer avec le débit masse dans la lame. De plus notons qu'il existe une zone centrale sans gradient de température, gradients qui ne sont observables que sur les contacts aux faces solides.

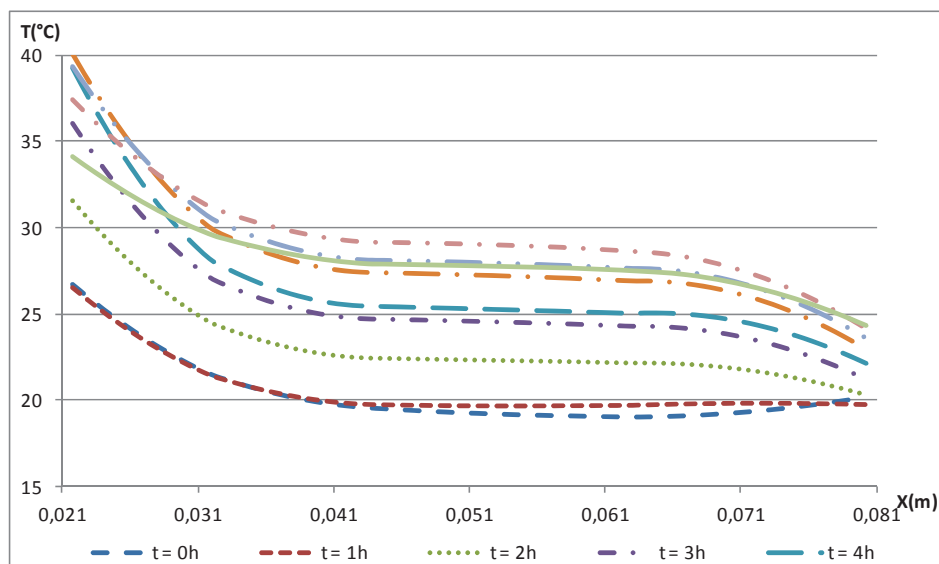


Figure 4.17 : Les profils de températures, au cours du temps, dans la lame d'air à la hauteur de 1,4 m. Plaque de parement en pin maritime et la lame d'air épaisse.

4.3.3 Températures et vitesses de l'air en hauteur médiane, parement en pin maritime.

La figure 4.18 présente les évolutions simulées des températures et des vitesses de l'air dans les lames d'air mince et épaisse avec plaque de parement en pin maritime en fonction de l'éclairement solaire et ce pour un point médian en hauteur et largeur, point correspondant au point d'accès aux valeurs expérimentales.

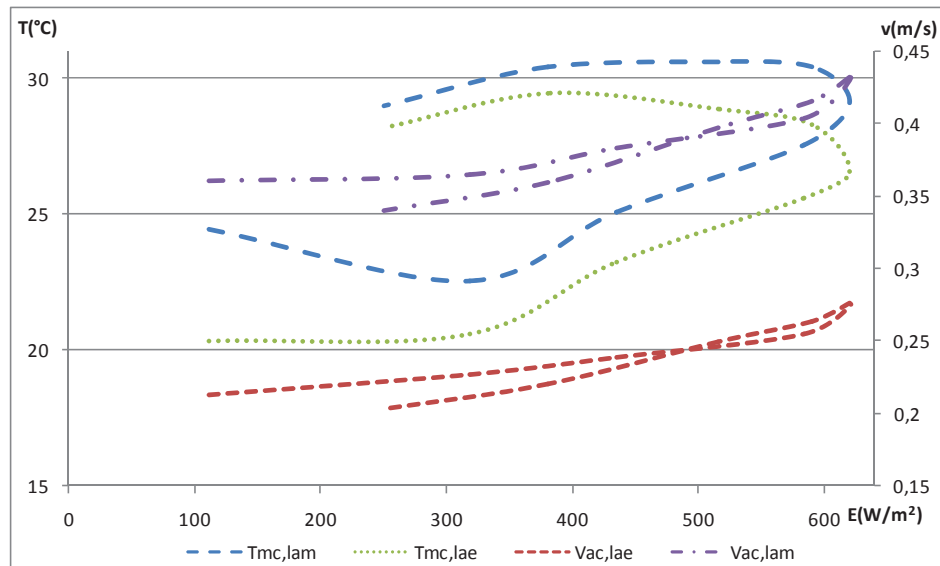


Figure 4.18 : Evolution des températures et vitesses de l'air simulées dans les lames d'air mince et épaisse avec plaque de parement en pin maritime en fonction de l'éclairement solaire au point médian.

Les courbes représentées sur la figure 4.18 ont une évolution similaire à celle obtenue à partir des résultats expérimentaux. On note le même effet d'accumulation dans l'évolution des températures.

4.3.4 Plaque de parement en aggloméré et lame d'air mince

La figure 4.19 présente l'évolution des profils de température au cours du temps.

Comme pour le bardage en pin, à un instant donné la décroissance progressive des températures est constatée depuis la face extérieure du parement jusqu'à la face extérieure du mur support, et ce en accord avec la résistance thermique de la plaque de parement en pin maritime et du mur isolant et de l'évacuation de l'air par le canal entre plaques. La plaque de parement en aggloméré étant moins résistive et plus absorbante, les températures obtenues sur cette plaque sont supérieures à celles de la plaque de parement en pin maritime. Ensuite en suivant, localement, l'évolution temporelle on note la cohérence avec la courbe d'éclairement et la pondération liée aux masses thermiques en jeu.

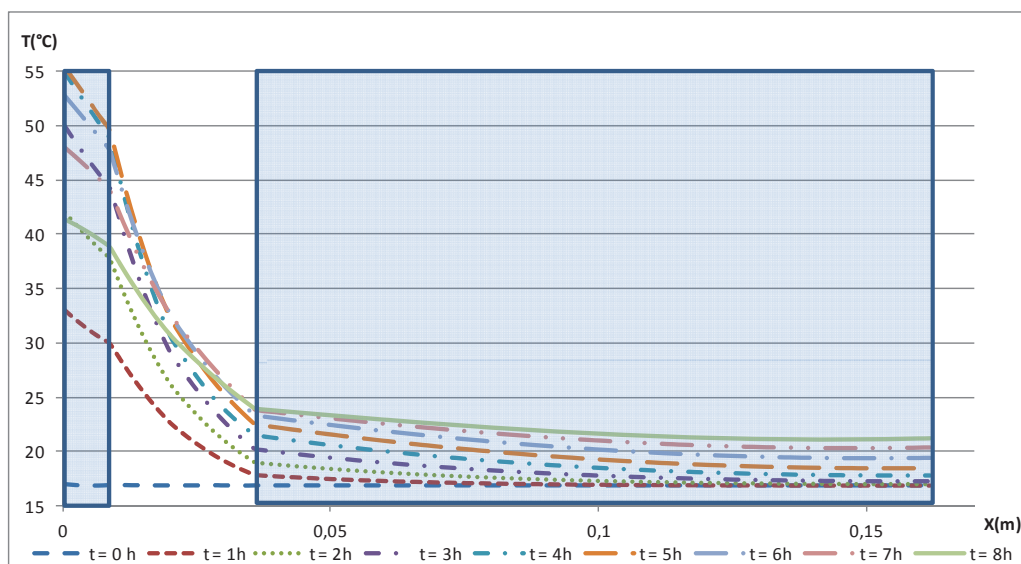


Figure 4.19 : Evolution simulée, au cours du temps, des profils de température à la cote de 1,4 m. Plaque de parement en aggloméré et la lame d'air mince.

Comme pour le bardage en pin, à un instant donné la décroissance progressive des températures est constatée depuis la face extérieure du parement jusqu'à la face extérieure du mur support, et ce en accord avec la résistance thermique de la plaque de parement en pin maritime et du mur isolant et de l'évacuation de l'air par le canal entre plaques. La plaque de parement en aggloméré étant moins résistive et plus absorbante, les températures obtenues sur cette plaque sont supérieures à celles de la plaque de parement en pin maritime. Ensuite en suivant, localement, l'évolution temporelle on note la cohérence avec la courbe d'éclairement et la pondération liée aux masses thermiques en jeu.

L'écart des profils de température dans la lame d'air montre que le mur isolant reçoit plus d'énergie que dans la configuration du bardage avec plaque de parement en pin maritime et ceci conforte les résultats obtenus avec les flux thermiques dans le dispositif avec plaque de parement en aggloméré puisque cette plaque a moins d'inertie thermique et les distances sont telles que le flux thermique non évacué reste plus élevé que celui des dispositifs de bardage avec plaque de parement en pin maritime. Ce flux thermique est ensuite orienté vers la surface intérieure du mur donnant sur la zone habitable.

Un éclairage particulier est porté sur la lame d'air figure 4.20. La chaleur qui parvient à la surface intérieure de la plaque de parement est quasiment évacuée par la lame d'air et seulement une petite partie est transmise au mur support. Un gradient de température net est observé entre la face chaude (parement) et froide (mur support).

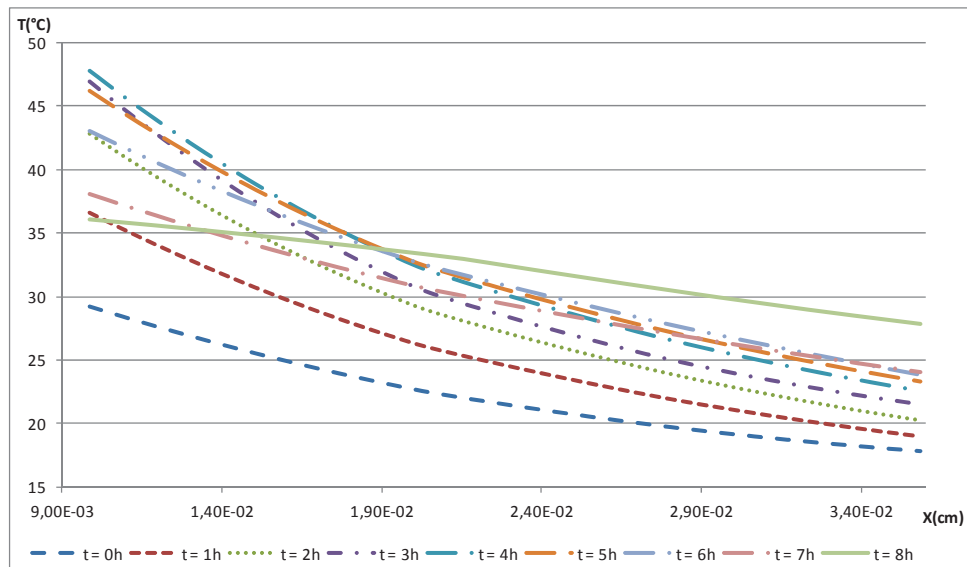


Figure 4.20 : Les profils de températures, au cours du temps, dans la lame d'air à la hauteur de 1,4 m. Plaque de parement en pin aggloméré et la lame d'air mince.

4.3.5 Plaque de parement en aggloméré et lame d'air épaisse

La figure 4.21 présente l'évolution des profils de température au cours du temps. Les comportements observés, à un instant donné, sont globalement similaires à ceux pour la configuration en lame mince. Une différence est notée quant à l'évolution temporelle liée à l'éclairement, ceci sera repris plus avant.

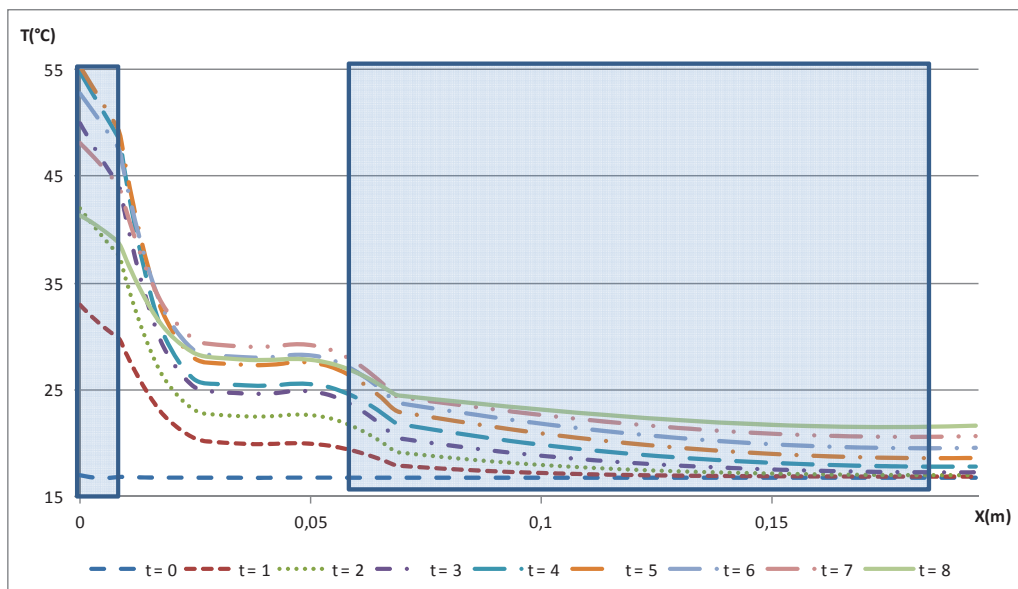


Figure 4.21 : Evolution simulée, au cours du temps, des profils de température à la cote de 1,4 m. Plaque de parement en aggloméré et la lame d'air épaisse.

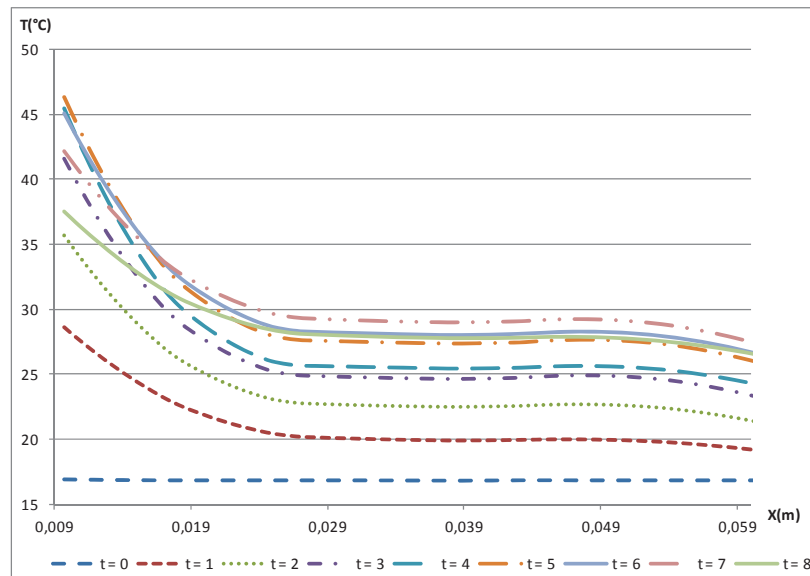


Figure 4.22 : Les profils de températures, au cours du temps, dans la lame d'air à la hauteur de 1,4 m. Plaque de parement en pin aggloméré et la lame d'air épaisse.

Notons sur la figure 4.22 qu'il existe une zone centrale sans gradient de température, gradients qui ne sont observables que sur les contacts aux faces solides. Les niveaux de températures sont ici aussi plus faibles que dans la configuration mince et sont aussi corrélés avec le débit masse dans la lame. La chaleur qui parvient à la surface intérieure de la plaque de parement est évacuée par la lame d'air.

4.3.6 Températures et vitesses de l'air en hauteur médiane, parement en aggloméré

La figure 4.23 présente les évolutions simulées des températures et des vitesses de l'air dans les lames d'air mince et épaisse avec plaque de parement en aggloméré en fonction de l'éclairement solaire et ce pour un point médian en hauteur et largeur, point correspondant au point d'accès aux valeurs expérimentales.

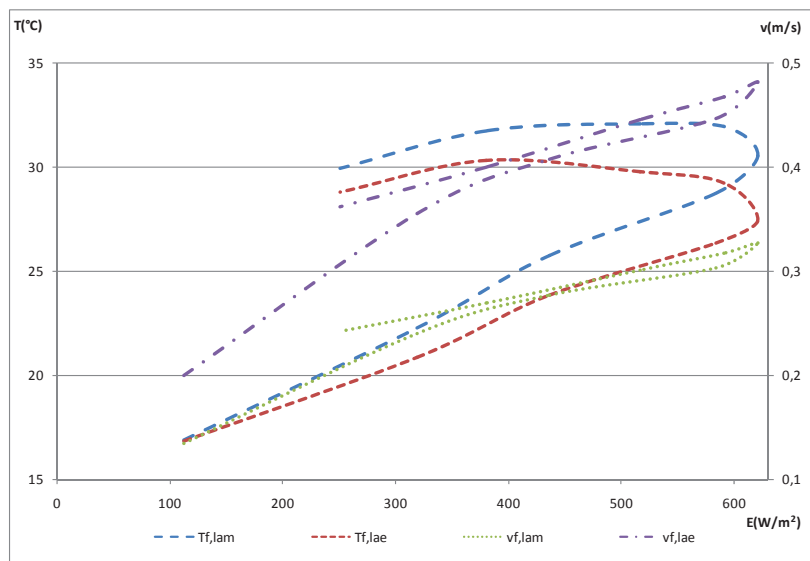


Figure 4.23 : Evolution des températures et vitesses de l'air simulées dans les lames d'air mince et épaisse avec plaque de parement en aggloméré en fonction de l'éclairement solaire au point médian.

Les courbes représentées sur la figure 4.23 ont une évolution similaire à celle obtenue à partir des résultats expérimentaux. On note le même effet d'accumulation dans l'évolution des températures. Notons globalement des niveaux de température et des vitesses supérieures à celles obtenues pour le parement en pin maritime.

En complément de ces résultats notons que les simulations sur les vitesses de l'air montrent que ces vitesses ont des valeurs quasi identiques que se soit à l'entrée, en hauteur médiane ou à la sortie du canal ventilé et que la seule évolution est due à l'évolution de l'éclairement.

4.4. Résultats et discussions

Le modèle thermique global en période chaude ensoleillée a montré que le facteur de transmission de chaleur du système mural est fonction de la lame d'air par rapport à son épaisseur et de l'émissivité de ses surfaces et du niveau de l'isolation paroi.

L'influence de la distance bardage - enveloppe avec la lame d'air de deux épaisseurs en configurations ouverte et fermée sur l'efficacité du système est analysée pour trois conditions climatiques. En effet, en période estivale, la présence de la lame d'air ventilée est importante dans la minimisation du flux de chaleur vers le mur intérieur donc, du confort d'été par rapport au cas où il n'y aurait pas de lame d'air ou avec une lame d'air non circulante. En période automnale pendant les journées ensoleillées, le système de bardage a un comportement similaire à celui de la période estivale. Les résultats en période hivernale ont montré que cette lame d'air ouverte a aussi un impact sur la définition des

performances thermiques du système puisque malgré la faiblesse du rayonnement solaire incident et de la basse température ambiante, la température de l'air dans le canal est toujours supérieure à la température ambiante et ceci permet de stabiliser la température dans l'habitat.

Les tests sur la configuration de lame d'air non circulante exposés dans la partie expérimentale permettent d'utiliser la chaleur accumulée par le mur bardé fermé comme composante active du chauffage de l'environnement interne.

Les dimensions et les conditions thermiques des surfaces délimitant la lame d'air ont leur importance sur le comportement du dispositif de bardage. Plusieurs configurations sont analysées pour souligner l'importance de l'épaisseur du bardage de parement et de la lame d'air. Un bardage de parement plus épais avec une petite conductivité thermique absorbe beaucoup de chaleur en surface et la faible conduction ne permet pas à cette chaleur de se propager vers l'intérieur et d'échanger par convection et rayonnement dans la lame d'air.

Pour chaque configuration constructive, différents scénarios des essais ont été menés à Levignacq (un vrai mur) et à l'ENSAM Talence (murs montés sur une façade en

béton). Un mur isolant en béton n'a pas un comportement identique à celui d'un mur composite à ossature bois même si les deux sont protégés par la même plaque de parement puisque la nature, l'épaisseur des isolants et leurs placements sont différents.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail a traité la problématique du transfert thermique à travers le dispositif de bardage d'un bâtiment soumis à un rayonnement solaire incident, afin d'en étudier le comportement thermique. L'instrumentation mise en place à différentes hauteurs dans la lame d'air entre plaques et dans le mur, permet de suivre le comportement des parois dans les singularités constructives en fonction de conditions météorologiques mesurées sur place. En parallèle de cette expérimentation, certaines des caractéristiques des matériaux employés ont été mesurées.

Pour seconder cette étude expérimentale en conditions réelles, nous avons mis en place un modèle physique. Le modèle développé est basé sur la modélisation bidimensionnelle des transferts de chaleur dans les parois afin de représenter les échanges convectifs et radiatifs dans les lames d'air ventilées et les échanges radiatifs dans les lames d'air étanches.

Le modèle thermique global en période chaude ensoleillée a montré que le facteur de transmission de chaleur du système mural est fonction de la lame d'air par rapport à son épaisseur et de l'émissivité des surfaces des parois qui forment le canal et du niveau de l'isolation du mur support. Le coefficient de transfert thermique global du système mural est réduit avec une efficacité croissante de l'extraction par la lame d'air.

L'influence de la distance bardage - enveloppe avec la lame d'air de deux épaisseurs en configurations ouverte et fermée sur l'efficacité du système est analysée pour trois conditions climatiques. En effet, en période estivale, la présence de la lame d'air ventilée est importante dans la minimisation du flux de chaleur vers le mur intérieur donc, du confort d'été par rapport au cas où il n'y aurait pas de lame d'air ou avec une lame d'air non circulante. Les résultats en période hivernale ont montré que la lame d'air ouverte a aussi un impact sur la définition des performances thermiques du système puisque malgré la faiblesse du rayonnement solaire incident et de la basse température ambiante, la température de l'air dans le canal est toujours supérieure à la température ambiante et ceci permet de stabiliser la température dans l'habitable. Pendant cette même période, la lame d'air non circulante permet de stocker de la chaleur pendant la journée et le dispositif de bardage devient une composante active du système de chauffage.

L'étude expérimentale effectuée sur des bardages thermiques verticaux en périodes estivale et hivernale, a porté sur l'influence de certains paramètres géométriques et opératoires, sur le débit d'extraction de l'air et l'énergie thermique évacuée par l'air ventilé. Les facteurs géométriques étudiés sont :

- L'écartement entre les parois absorbante et isolante constituant le dispositif de bardage,
- L'épaisseur de la paroi absorbante,
- Les caractéristiques radiatives des surfaces parallèles qui forment la lame d'air,
- Structure et agencement des parois isolantes.

L'assimilation du mécanisme de transfert de chaleur dans le bardage thermique à un transfert par convection naturelle entre deux plaques parallèles nous a permis d'établir une corrélation simple entre le flux thermique évacué et la différence de température entre les parois, et également, entre l'entrée et la sortie du canal, par les nombres de Rayleigh et de Nusselt. Le changement de l'écartement entre parois entraîne le changement de son rapport sur la hauteur du dispositif de bardage (e/H). La dépendance de la vitesse d'air sur ce rapport a été établie. La comparaison des tendances de température moyennes de l'air dans la lame d'air et de vitesses d'air en fonction de l'éclairement solaire a été effectuée. Nous avons également évalué globalement, l'influence de l'environnement proche (sol, les bâtiments voisins, ombrage, arbres).

Notre travail s'inscrit dans la lignée des travaux sur le thermique du bâtiment. Il pourra contribuer au transfert du savoir énergétique vers les pays du climat tropical et humide et ainsi améliorer les connaissances sur les transferts de chaleur dans les maisons et d'envisager des solutions techniques pour y remédier.

BIBLIOGRAPHIE

1. Acker M.T., Fourcher B. Analyse en régime thermique périodique du couplage conduction-convection entre un fluide en écoulement laminaire et une paroi de stockage. *Int. J. Heat Mass Transfer* Vol. 24, N°7, pp.1201 - 1210. (1981).
2. Aggarwala B.D., Iqbal M., On limiting Nusselt numbers from membrane analogy for combined free and forced convection through vertical ducts. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 12, pp. 737 – 748 (1969).
3. Anand N.K., Kim S.H., Aung Win. Effet of wall conduction on free convection between asymmetrically heated vertical plates: uniform wall heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 33, Issue 5, Pages 1013 – 1023 (May 1990).
4. Anand N.K., Kim S.H., Fletcher L.S. Effect of plate spacing on free convection between heated parallel plates. *Journal of Heat Transfer*. Volume 114 pages 515 – 518 (May 1992).
5. Auleta Antonio, Oronzio Manca, Marilena Musto, Sergio Nardini. Thermal design of symmetrically and asymmetrically heated channel – chimney systems in natural convection. *Applied Thermal Engineering* 23 605 – 621(2003).
6. Aung Win. Fully developed laminar free convection between vertical plates heated asymmetrically. *Int. J. Heat Mass Transfer* 15, 1577 – 1580 (1972).
7. Aung Win, Fletcher L.S., Sernas V. Developing laminar free convection between vertical flat plates with asymmetric heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 15, Issue 11, Pages 2293 – 2308 (November 1972).
8. Arce J., Jiménez M.J., Guzman J.D., Heras M.R., Alvarez G., Xaman J. Experimental study for natural ventilation on a solar chimney. *Renewable Energy* 34 2928–2934 (2009).
9. Balocco Carla. A simply model to study ventilated façades energy performance. *Energy and Buildings* 34, 469 – 475 (2002).
10. Bansal N.K., Mathur Jyotirmay, Mathur Sanjay, Jain Meenakshi. Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation. *Building and Environment* 40, 1302 – 1308, (2005).
11. Bar – Cohen A., Roshenow W.M. Thermally Optimum Spacing of Vertical, Natural Convection Cooled, Parallel Plates. *Transactions of the ASME. Journal of Heat Transfer*. Vol. 106, (February 1984).
12. Bassiouny Ramadan, Nader S.A. Koura. An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation. *Energy and Buildings* 40 865–873,(2008).
13. Bencheikh Hamida. Etude et réalisation d'un système de refroidissement passif en utilisant une toiture radio-évaporative dans les climats chauds et humides. Thèse doctorale. *Université Mentouri de Constantine* (2007).
14. Benkhalifa A., Penot F. Etude expérimentale des mouvements de convection naturelle dans une cavité différentiellement chauffée inclinée. Influence de l'inclinaison. *12èmes Journées Internationales de Thermique*, (2005).
15. Berger X, Buriot D, Garnier F. About the equivalent radiative temperature for clear skies. *Solar Energy*;32(6):725–33 (1984).
16. Bernard Jacques. Energie solaire (Calculs et optimisation). *Edition Ellipses*. ISBN 978 – 2 – 7298 – 1897 – 5. (2004).
17. Bouchair A., Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria. *Building Service Engineering, Research and Technology*, 15(2), pp. 81 – 93 (1994).
18. Bouvier François. Soleil et architecture. *Techniques de l'ingénieur*. Référence C3310. Date de publication 10 novembre 1981.
19. Burch T., Rhodes T., Acharya S. Laminar natural convection between finitely conducting vertical plates. *International Journal Heat and Mass Transfer*. Volume 28. N° 6, pp. 1173 – 1186, (1985).

20. Burek S.A.M., Habeb A. Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe walls. *Energy and Buildings* 39 128 – 135 (2007).
21. Chami Nada. Evaluation de l'impact des isolants minces réfléchissants dans le bâtiment. *Thèse Mines Paris Tech.* (2009).
22. Chassériaux J.-M. Conversion thermique du rayonnement solaire. *Dunod Bordas*, ISBN : 2-04-015601-1 Paris (1984).
23. Cheng Chin-Hsiang, Weng Chung-Jen, Aung Win. Buoyancy-assisted flow reversal and convective heat transfer in entrance region of a vertical rectangular duct. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21 403 – 411(2000).
24. Churchill Stuart W. A comprehensive correlating equation for laminar, assisting, forced and free convection. *AIChE Journal* (vol. 23, N° 1) pp. 10 – 15 (January, 1977).
25. Churchill Stuart W. and USAGI R. A general Expression for the Correlation of Rates of transfer and Other Phenomena. *AIChE Journal* (vol. 18, N° 6). pp. 1121 – 1128. (November 1972).
26. Churchill Stuart W. Churchill Renate U., A comprehensive correlating equation for heat and component transfer by free convection. *AIChE Journal*. Vol. 21, N° 3. pp. 604 – 606, (May, 1975).
27. Dalbert A. M., Peube J. L., Penot F. et Robert J.-F. Etude de l'écoulement dans un collecteur plan. *Revue Phys. Appl.* 15 201 – 206, (1980).
28. Dalbert A. M., Penot F. et Peube J. L. Convection naturelle laminaire dans un canal vertical chauffé a flux constant. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol.20 N° 9 pp. 1463 – 1473, (1981).
29. Dal Zotto P., Larre J.M., Merlet A., Picau L. *Mémotech génie énergétique*. Ed : Educavivre, Editions CASTEILLA. ISBN 2 – 7135 – 1644 – 7.(1996).
30. Daouas Naouel, Hassen Zaine, Ben Aissia. Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia. *Applied Thermal Engineering* 30, 319 – 326 (2010).
31. Desautel Jacques. Les capteurs héliothermiques *EDISUD/ technologies douces PYC – EDITION* ISBN 2-85744-039-1, (1979).
32. De Laroche Lambert Thierry. Etude expérimentale et numérique des transferts de chaleur en convection naturelle le long des parois verticales épaisses rayonnantes fortement chauffées. *Congrès français de thermique*, SFT 2000, Lyon, (15 – 17 mai 2000).
33. Deval J.C. Le climat thermique en climat tempéré. *Revue phys. Appl.* 19 (1984) 513 – 531. Juillet 1984.
34. Dhirendra K. Pandey, Lee III Robert B., Paden Jack. Effects of atmospheric emissivity on clear sky temperatures. *Atmospheric Environment* vol. 29 N° 16, pp. 2201 – 2204 (1995).
35. Ekechukwu O.V., Norton B. Design and measured performance of a solar chimney for natural circulation solar-energy dryers. *Renewable Energy*, Vol.10, N°1, pp. 81 – 90, (1997).
36. Elenbaas W., Heat dissipation of parallel plates by free convection, *Physica* 9 (1) 1 – 24, (1942).
37. Eyglunent Bernard. Manuel de Thermique, Théorie et Pratique. 2^e édition revue et augmentée. *Hermes Science Publications*, 1997, ISBN 2 – 86601 – 615 – 7 (2000).
38. Fanger P.O. Calculation of thermal comfort : introduction of a basic comfort equation. *ASHRAE Trans.* 73, II, 1967.
39. Fatre Nicolas. Produits préfabriqués en béton - Pour le bâtiment (murs et planchers). *Techniques de l'ingénieur*. Référence C2259 | Date de publication : 10 oct. 2007.
40. Fedorov A.G. and Viskanta R. Turbulent natural convection heat transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel – plate channel. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol.40 N° 16 pp. 3849 – 3880 1997.
41. Flourentzou F, Van der Maas J, Roulet C. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. *Energy and Buildings* 27, 283 – 292, (1998).

42. Gallet Paulin, Papini François; Péri Georges. Physique des convertisseurs héliothermiques. *EDISUD ISBN 2 – 85744 – 070 – 7*, (1978).
43. Gan Guohui. A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings. *Energy and Buildings* 27 (1998), 37 – 43.
44. Himanshu M. Joshi. Transient effects in natural convection cooling in vertical parallel plates. *Int. Comm. Heat Mass Transfer* Vol. 15, pp. 227 - 238, Pergamon Press. (1988).
45. Hirunbulabh Jongjit, Wachirapudawon Sopin, Pratinthong Naris, Khedari Joseph. New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation. *Building and Environnement* 36, 383 – 391, (2001).
46. Jannot M., Mazeas C. Etude expérimentale de la convection naturelle dans des cellules rectangulaires verticales. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 16, pp. 81 – 100. Pergamon Press (1973).
47. Klarsfeld Sorin, Langlais Catherine. Isolation thermique à température ambiante. Applications. *Techniques de l'ingénieur*. Référence BE9861 | Date de publication : 10 avril 2004.
48. Kettleborough C.F. Transient laminar free convection between heated vertical plates including entrance effects. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. Vol. 15, pp. 883 – 896. Pergamon Press (1972).
49. Kim S. H., Anand N. K., Aung Win. Effet of wall conduction on natural convection between vertical plates hot differently: uniform heat flux at the wall. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 33, N°5, PP. 1013-1023, (1990).
50. Kim S.H., Anand N. K., Fletcher L. S. Free convection between series of vertical parallel plates with embedded line heat sources. *Journal of Heat Transfer*. Vol. 113, pp. 108 – 115, (February 1991).
51. Kim S.H., Anand N. K., Fletcher L. S. Natural convection between series of vertical parallel plates with the insertion of a line heat source. Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843 *Journal of Heat Transfer* Vol. 111, pp. 98 – 101 (1993).
52. Krishnan A.S., Premachandran B., Balaji E., Venkateshan S.P. Combined experimental and numerical approaches to multi-mode heat transfer between vertical parallel plates. *Science Direct. Elsevier. Experimental Thermal and Fluid Science* 29 75 – 86, (2004).
53. Lee Y., Korpella S.A. Multicellular natural convection in a vertical slot, *Journal of Fluid Mechanics* 126 91 – 121, (1983).
54. Lefebvre Gilles. Comportement thermique dynamique des bâtiments : simulation et analyse. Référence : B2041. *Techniques de l'Ingénieur*. (1994).
55. La Pica A., Rodono G., Volpes R. An experimental investigation of natural convection of air in a vertical channel. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 36, N° 3, pp. 611 – 616, 1993.
56. L'hostis Valérie, Taché Guy, Raharinarivo André. Corrosion des armatures dans les bétons - Exemples et actions. *Techniques de l'ingénieur*. Référence COR408 | Date de publication : 10 juin 2009.
57. Manz Heinrich. Numerical simulation of heat transfer by natural convection in cavities of façade elements, *Energy and Buildings* 35, 305 – 311, (2003).
58. Marinosci C. Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen façade building. *Energy and Buildings*. Volume 43, Issue 4, pp. 853 – 863, (April 2011).
59. Mathur Jyotirmay, BANSAL N.K., Mathur Sanjay, Meenakshi Jain, Anupma. Experimental investigations on solar chimney for room ventilation. *Solar Energy* 80 927–935, (2006).
60. Miyamoto M., Sumikawa J., Akiyoshi T. and Nakamura T. Effecta of axial heat conduction in a vertical flat plate on free convection heat transfer. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 23, pp. 1545 – 1553, (1980).

61. Mokni Ameni, Mhiri Hatem, Le Palec Georges, Bournot Philippe. Influence de la position du jet sur le transfert thermique dans un canal vertical chauffé par un flux constant. *12èmes Journées Internationales de Thermique*. Tanger, Maroc du 15 au 17 (Novembre 2005).
62. Nelson D. J., Wood B.D. Combined heat and mass transfer natural convection between vertical parallel plates. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 32, N° 9, pp. 1779 – 1787, 1989.
63. Oiry H. et Bardon J.P. Comportement thermique de différents types d'habitation soumis à un ensoleillement et à une température extérieure périodiques. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol.28 N° 11 pp. 1991 – 2004, (1985).
64. Ong K.S., A mathematical model of a solar chimney. *Renewable Energy* 28, 1047 – 1060, (2003).
65. Ormiston S.J., Raithby G.D., Hollands K.G.T. Numerical predictions of natural convection in a Trombe wall system. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 29, N°6, pp. 869 – 877, (1986).
66. Ozel M., Pihtili K. Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations. *Building and Environnement* 42, 3051 – 3059, (2007).
67. Ozel M., Pihtili K. Investigation of the most suitable location of insulation applying on building roof maximum load leveling point of view. *Building and Environnement* 42, 2360 – 2368, (2007).
68. Perrin Ludovic, Menard Valérie, Reulet Philippe, Micheli Francis. Caractérisation par voie expérimentale des aspects dynamiques et thermiques d'un écoulement de convection naturelle en espace confiné. *Congrès Français de Thermique, SFT 2005*, Reims, 30 mai – 2 juin (2005).
69. Piot Amandine. Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique. Thèse. *Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*. N° d'ordre 2009 – ISAL – 0080, (2009).
70. Puiggali J.R., F. Penot. Analyse du comportement dynamique et thermique d'un séchoir solaire constitué d'un capteur à matrice poreuse couplé à une cheminée solaire. *Revue Phys. Appl.* 18 625 – 633 (1983).
71. Raji Abdelghani, Hasnaoui Mohamed. Corrélations en convection mixte dans les cavités ventilées. *Rev. Gen. Therm.* 37; 874 – 884. Elsevier, Paris (1998).
72. Ramanathan S., Kumar R. Correlations for natural convection between Heated Vertical Plates. *Journal of Heat Transfer*. February, Vol. 113 pp. 97 – 107 (1991).
73. Raymond J., Bilgen E. On the thermal and ventilation performance of composite walls. *Energy and Buildings* 39, 1041 – 1046, (2007).
74. Recknagel. Manuel pratique du génie climatique. Données fondamentales. 3^e édition (*PYC Edition Livres*). ISBN 2 – 911008 – 00 – 6 (1995).
75. Ryan D., Burek S.A.M. Experimental study of the influence of collector height on the steady state performance of a passive solar air heater. *Solar Energy* 84, 1676 – 1684, (2010).
76. Sébastien P., Bruneau D., Collignan A., M. Rivier. Drying and smoking of meat: heat and mass transfer modelling and experimental analysis. *Science Direct. Journal of Food Engineering* xxx (2004) xxx-xxx.
77. Sollicec C., Barnaud G., Chaibi A. Procedure de dimensionnement au vent des bardages et vetures: approches expérimentale et numérique. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 48, 95 – 110, (1993).
78. Sparrow E.M., Prakash C. Interaction between internal natural convection in an enclosure and an external natural convection boundary layer flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 24, N° 5, pp. 895 – 907, (1981).
79. Soubdhan T., Feuillard T., Badé F., Experimental evaluation of insulation material in roofing system under tropical climate. *Solar Energy*. [2005].
80. Stagno Bruno. Construire en milieu tropical. *Projet ecoamérique*. (Mars 2009).
81. Tang Runsheng, Etzion Y., Meir I.A.. Estimates of clear night sky emissivity in the Negev Highlands, Israel. *Energy Conversion and Management* 45, 1831–1843, (2004).

82. Tsang – Yuan Lin and Shou – Shing Hsieh. Natural convection of opposing/assisting flows in vertical channels with asymmetrically discrete heated ribs. *Int. J. Heat Mass Transfer* Vol. 33, N°10, pp.2295 – 2309. (1990).
83. Ususkin C.M., Sparrow E.M. Thermal radiation between parallel plates separated by an absorbing-emitting nonisothermal gas. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol.1 pp. 28 – 36 Pergamon press (1960).
84. Van Tuan Nguyen et Michel Lebouche. Pertes de charge des fluides non newtoniens thermo dépendants en écoulement entre deux plaques parallèles. *Elsevier. Science Direct. C. R. Mécanique* 335, 20 – 24, (2007).
85. Versteegh T.A.M., Nieuwstadt F.T.M. A direct numerical simulation of natural convection between two infinite vertical differentially heated walls scaling laws and wall functions. *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 42, 3673 – 3693 (1999).
86. Webb. B. W., Hill D.P. High Rayleigh Number laminar natural convection in an asymmetrically heated vertical channel. *Journal of Heat Transfer*.Vol. 111, pp. 649 – 656 (August 1989).
87. Wirtz R.A., Stutzman R.J. Experiments on free convection between vertical plates with symmetric heating. *Journal of Heat Transfer*. Vol. 104, pp. 501 – 507. (August 1982).
88. Xamán J., Álvarez G., Lira L., Estrada C. Numerical study of heat transfer by laminar and turbulent natural convection in tall cavities of façade elements. *Energy and Buildings* 37 pp. 787 – 794, (2005).
89. Yamada Yukio. Combined radiate on and free convection heat transfer in an vertical channel with arbitrary wall emissivities. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol.31, N°2, pp. 429 – 440. *Pergamon Journals* (1988).
90. Yan W.M., Lin T.F. Combined heat and mass transfer in natural convection between vertical parallel plates with film evaporation. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol.33. N°3, pp. 529 – 541 *Pergamon press* (1990).
91. Yguel F. et Penot F. Etude théorique de la convection bidimensionnelle instationnaire dans un mur soumis à un flux radiatif uniforme. *Revue Phys. Appl.* 17 pp. 607 – 615, (1982).
92. Zamora B., Kaiser A. S. Optimum wall-to-wall spacing in solar chimney shaped channels in natural convection by numerical investigation. *Applied Thermal Engineering* 29 762 – 769, (2009).
93. Zohra Bakhti Fatima, Siameur Mohamed, Chehhat Abdelmadjid. Simulation numérique de la convection naturelle laminaire dans une conduite verticale. Manuscrit auteur, publié dans *JITH 2007*, Albi: France (2007).

ANNEXES

Annexe A : Caractéristiques techniques des instruments de mesure

A.1 Essai de Levignacq

Sonde de rayonnement total ALMEMO FL A613-GS	
Caractéristiques techniques	
Plage de mesure globale	0 à 1200 W/m ²
Sensibilité spectrale	400nm à 1100 nm
Sensibilité spectrale max.	780 nm
Résolution	1 W/m ²
Unité	W.m
Température de fonctionnement	-20°C à +60°C
Signal de sortie	0V à 2V
Correction cos	erreur f2 < 3%
Linéarité	< 1%
Erreur absolue	< 10%
Tension résiduelle (E = 0)	< 10 mV
Masse	env. 300g
EcoLogger	
Généralités	
Dimensions	H50 × L230 × P110 mm
Poids	509 grammes
Alimentation	Transformateur externe 12V
Mémoire	De 48770 à 381300 mesures (toutes voies activées)
Fréquence d'acquisition	De 1 à 120 minutes (avec un réglage possible à la minute)
Communication	RS232 (port série)
Capteurs et voies	
Température	-10°C à +50°C ± 0,1°C
Humidité	0 à 100% ± 2%
16 entrées (8 par face)	Port RJ45 pour capteurs SHT75 branchés sur des câbles d'une longueur de 25 mètres maximum
Précision de la mesure de température	De 0 à 120°C±1°C
Précision de la mesure d'humidité relative	De 0 à 100% ±2%
Précision de la mesure au point de rosée	à 25°C
Anémomètre thermique ALMEMO FV A605 TA1	
Plage	0,01 à 1 m/s
Résolution	0,001 m/s
Précision	±1,0% de pl. éch. ; ±1,5% de la mesure
Conditions nominales	22 °C
Compensation autom. de température	Active dans la plage 0 à 40 °C
Incidence de température	± 0,5% de la pleine échelle/°C
Température de fonctionnement	0 à 40 °C
Température de stockage	De – 30 à 90 °C



Sonde SHT75 qui permet au boîtier EcoLogger V2 de mesurer les températures et/ou humidité.

A.2 Essai du site ENSAM (Talence)

Sonde de rayonnement total ALMEMO FL A613-GS (voir TAB. : A.1)	
Anémomètre	
Type	Sonde NTC
Température de fonctionnement	-20 ... +50 °C
Précision	$\pm(0.1 \text{ m/s} + 5\% \text{ v.m.})$
Résolution	0.1 °C
Plage de mesure	0 ... 5 m/s
Thermocouples	
Gamme de tension maximum	-78.125 mV , 78.125 mV
Précision de la gamme de tension maximum	38 μV ce qui correspond à $\pm 0,5^\circ\text{C}$ au pire $\pm 0,7^\circ\text{C}$



Sonde SHT75 mesurant la température à l'entrée de la lame d'air et sur le mur isolant.



Sonde SHT75 mesurant la température basse de la surface intérieure de la plaque de parement.

Annexe B : Quelques données complémentaires

Le coefficient d'échange convectif pour décrire l'échange avec l'air extérieur est :
$$h_{vent} = 5,7 + 3,8V_{vent}$$

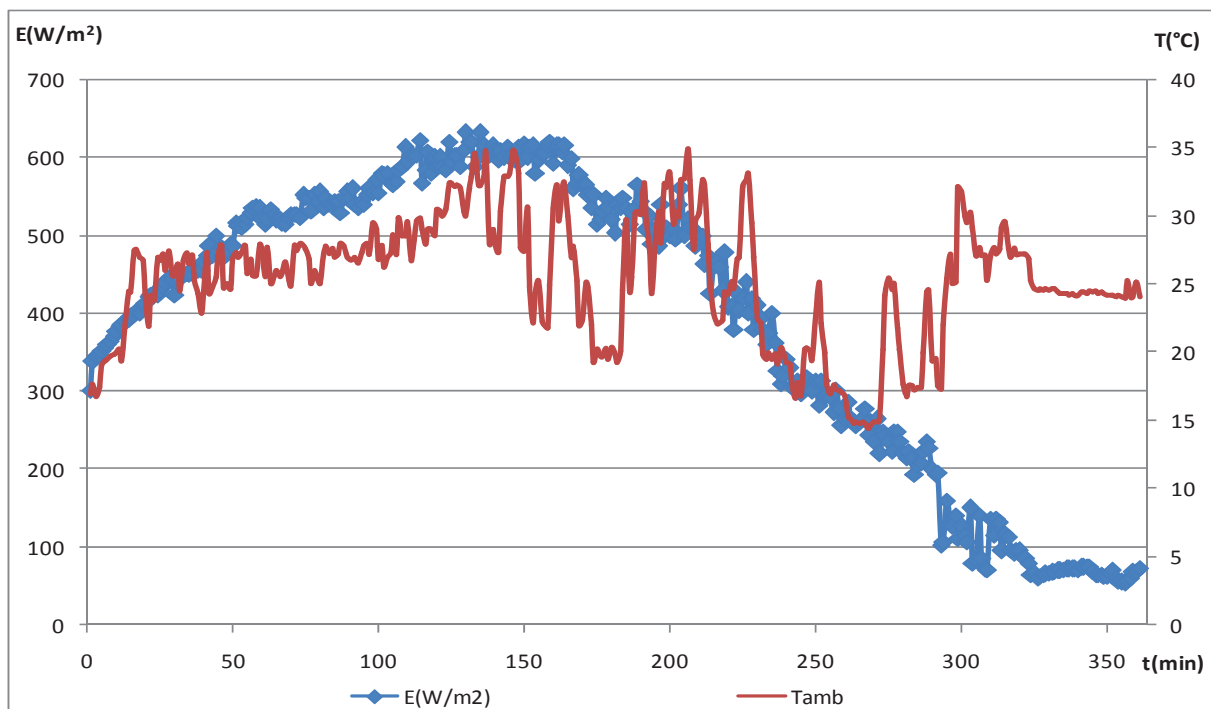
Les corrélations utilisées pour évaluer les propriétés physiques de l'air sont données ci-dessous en fonction de la température de l'air en Kelvin :

La viscosité dynamique	$\mu_f = 1,846 \times 10^{-5} + 0,00472 \times 10^{-5} (T_f - 300),$
La conductivité thermique	$\lambda = 0,0263 + 0,000074(T_f - 300)$
La capacité calorifique	$C_p = 1007 + 0,004(T_f - 300)$
La densité	$\rho = 1,1614 - 0,00353(T_f - 300)$

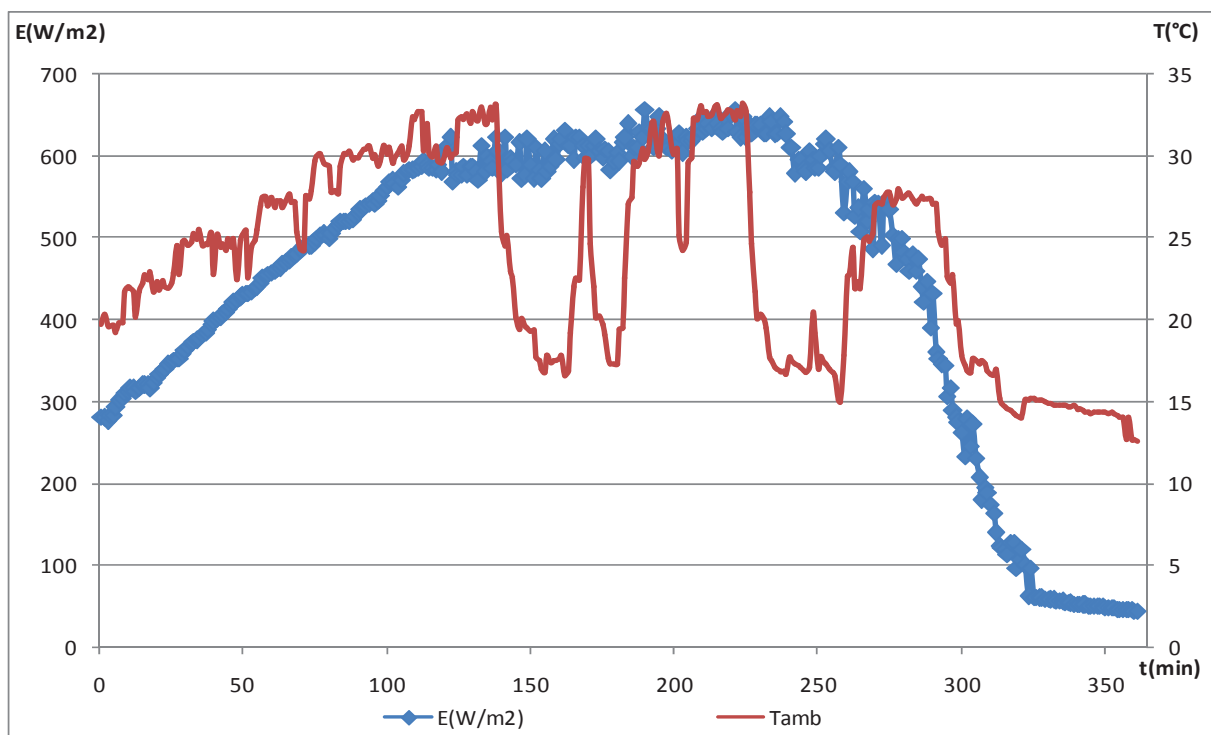
Les propriétés thermophysiques de l'air

Annexe C : Evolution de l'éclairement et températures

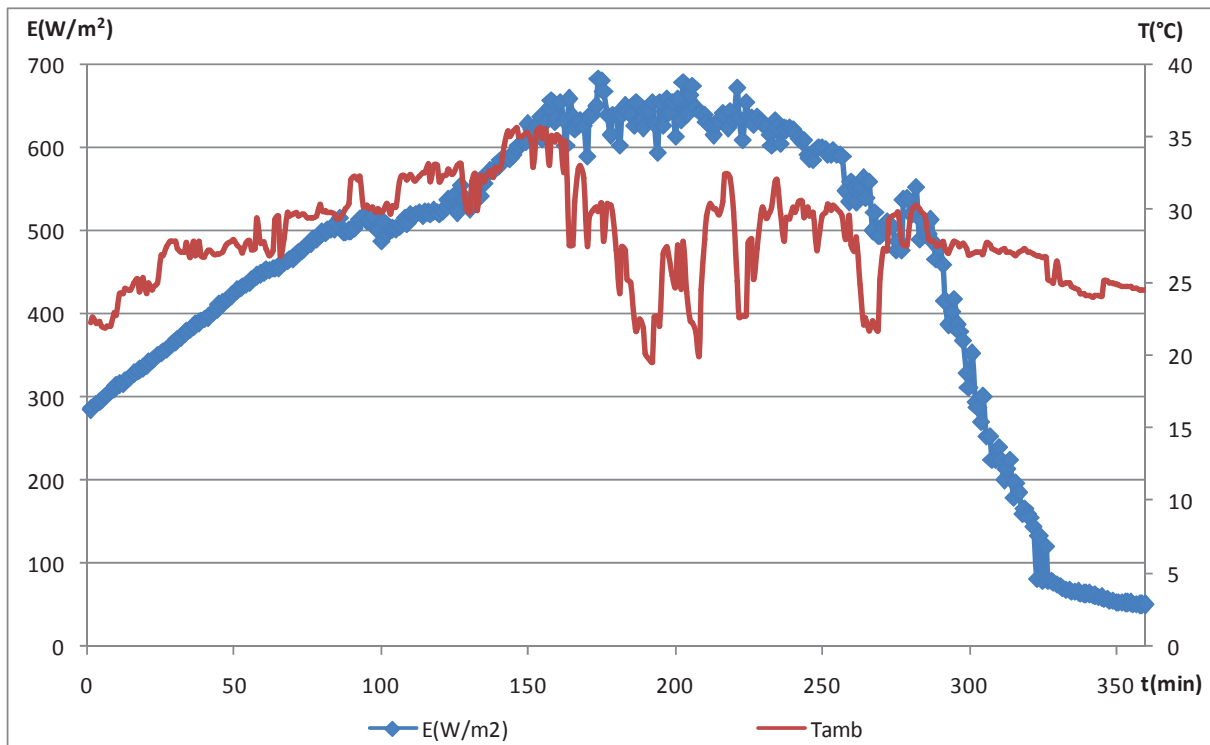
Séquence A



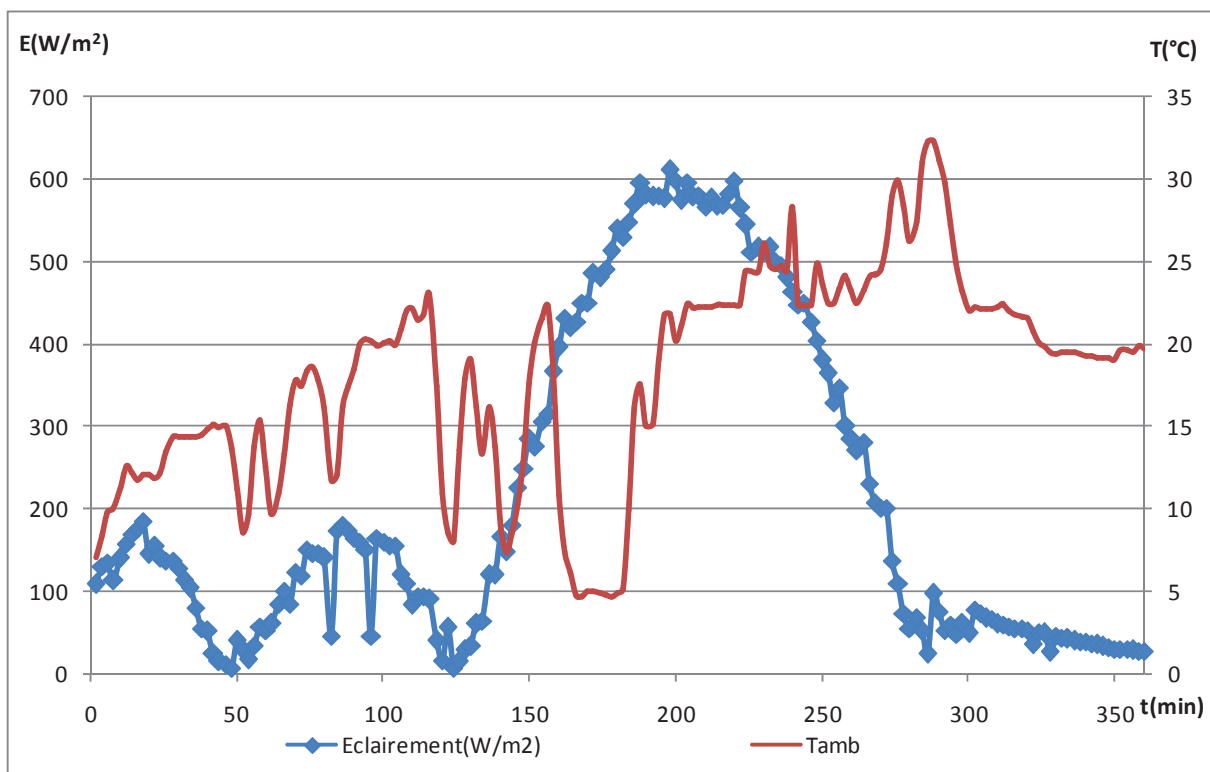
Evolution temporelle de l'éclairement et de la température ambiante (17/09/09)



Evolution temporelle de l'éclairement et de la température ambiante (27/09/09)

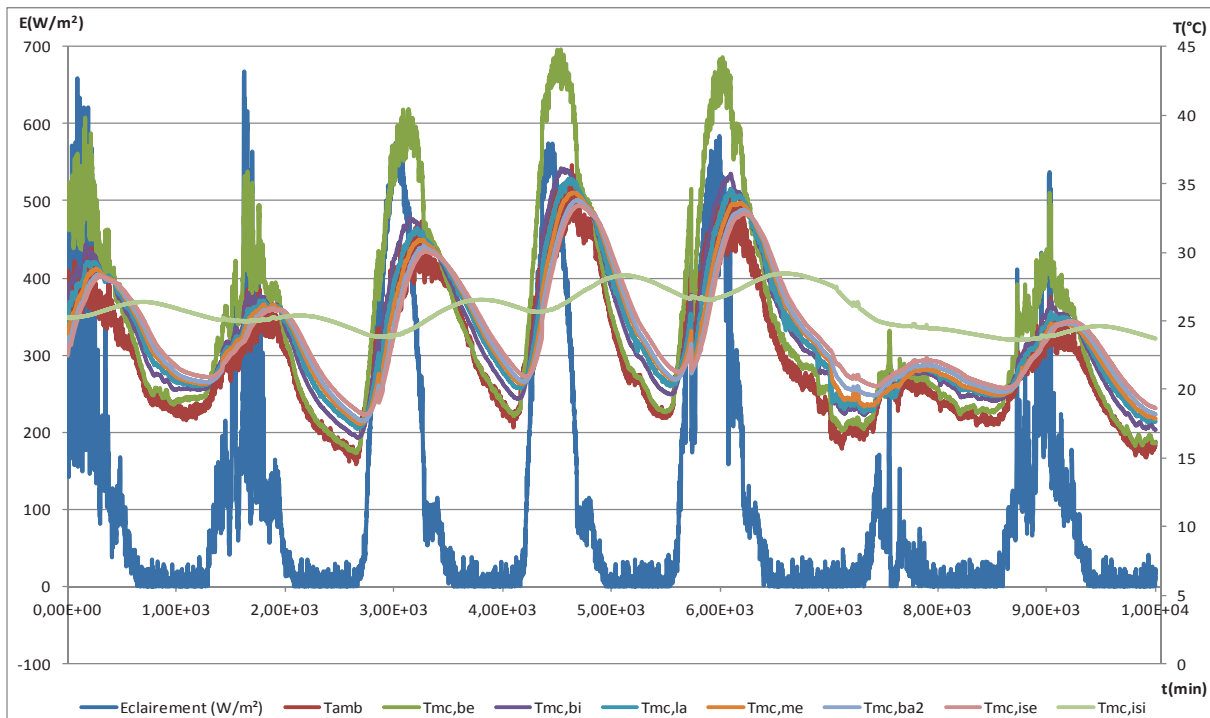


Evolution temporelle de l'éclairement et de la température ambiante (29/09/09)

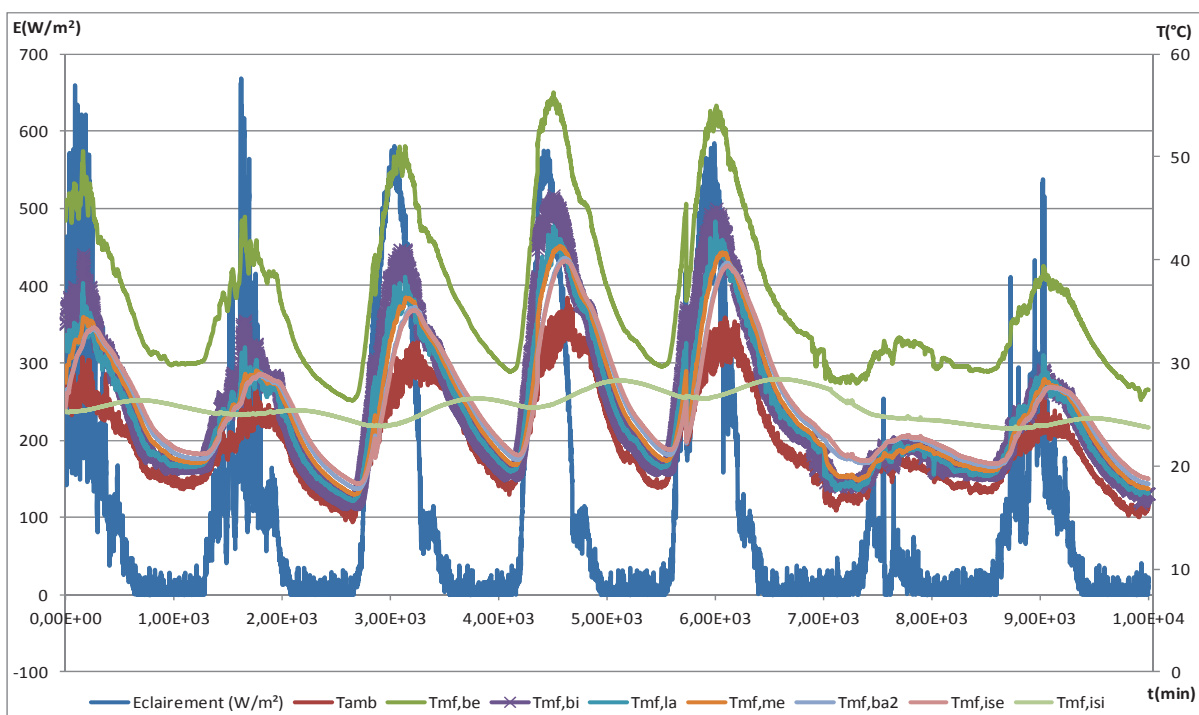


Evolution temporelle de l'éclairement et de la température ambiante (03/10/09)

Séquence B



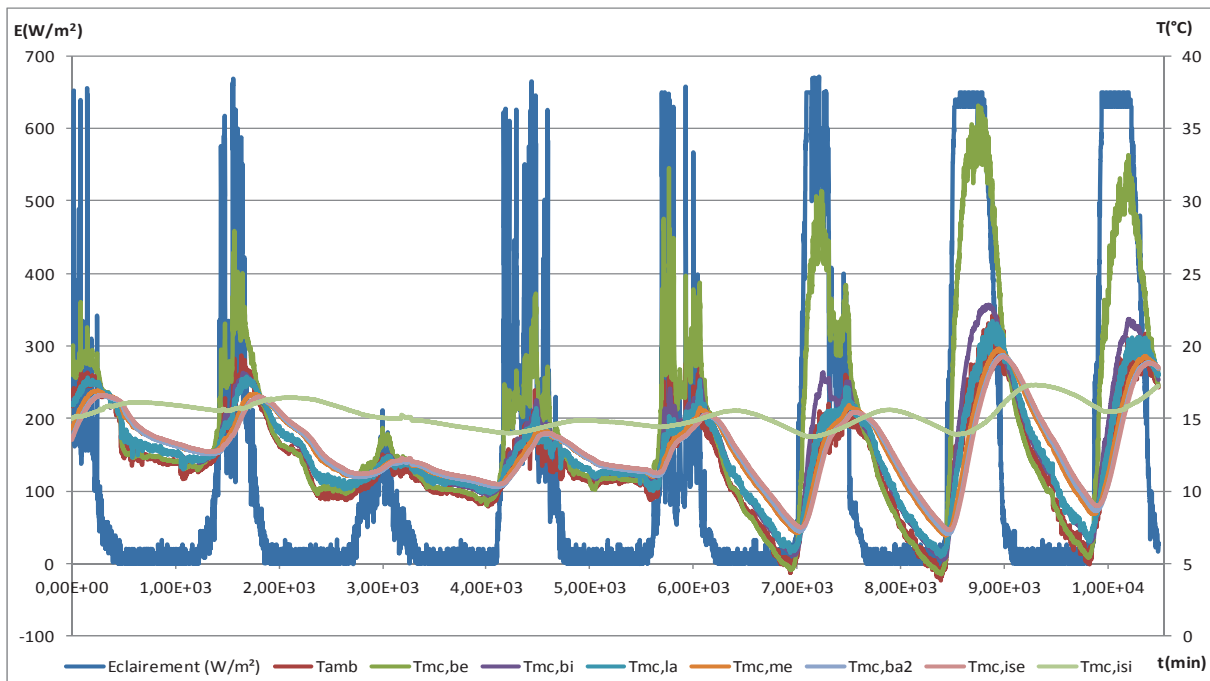
Evolution de l'éclairement et températures en mi-hauteur du dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime et lame d'air mince (séquence B) sur plusieurs jours (du 17 au 23 juillet 2010)



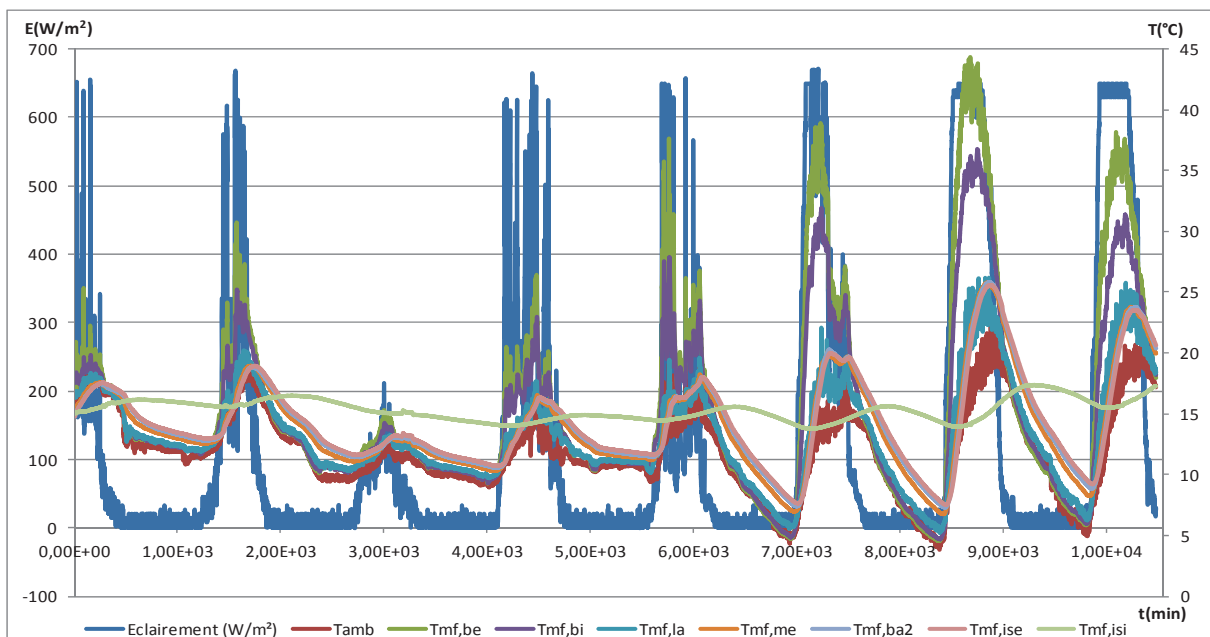
Evolution de l'éclairement et températures en mi-hauteur du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré et lame d'air mince ouverte (séquence B) sur plusieurs jours (du 17 au 23 juillet 2010)

Séquence C

Lame d'air épaisse ouverte

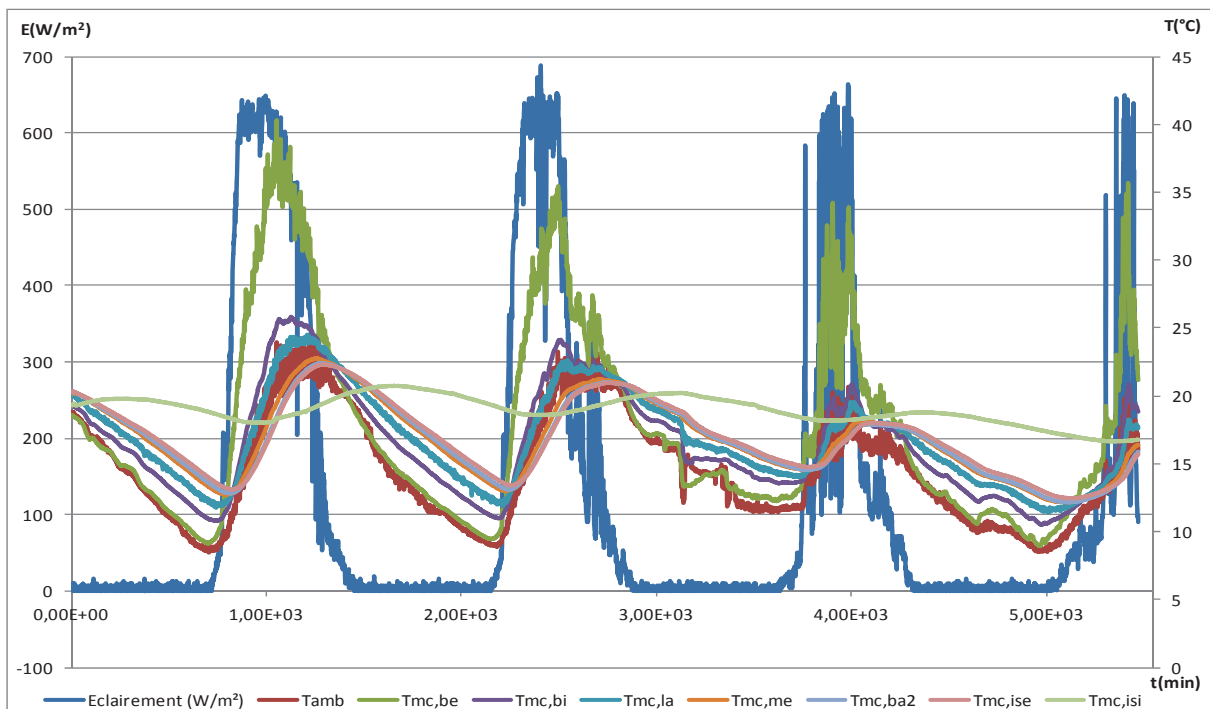


Evolution de l'éclairement et températures en mi-hauteur du dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime et lame d'air épaisse ouverte (séquence C) sur plusieurs jours (du 15 au 22 mars 2011)

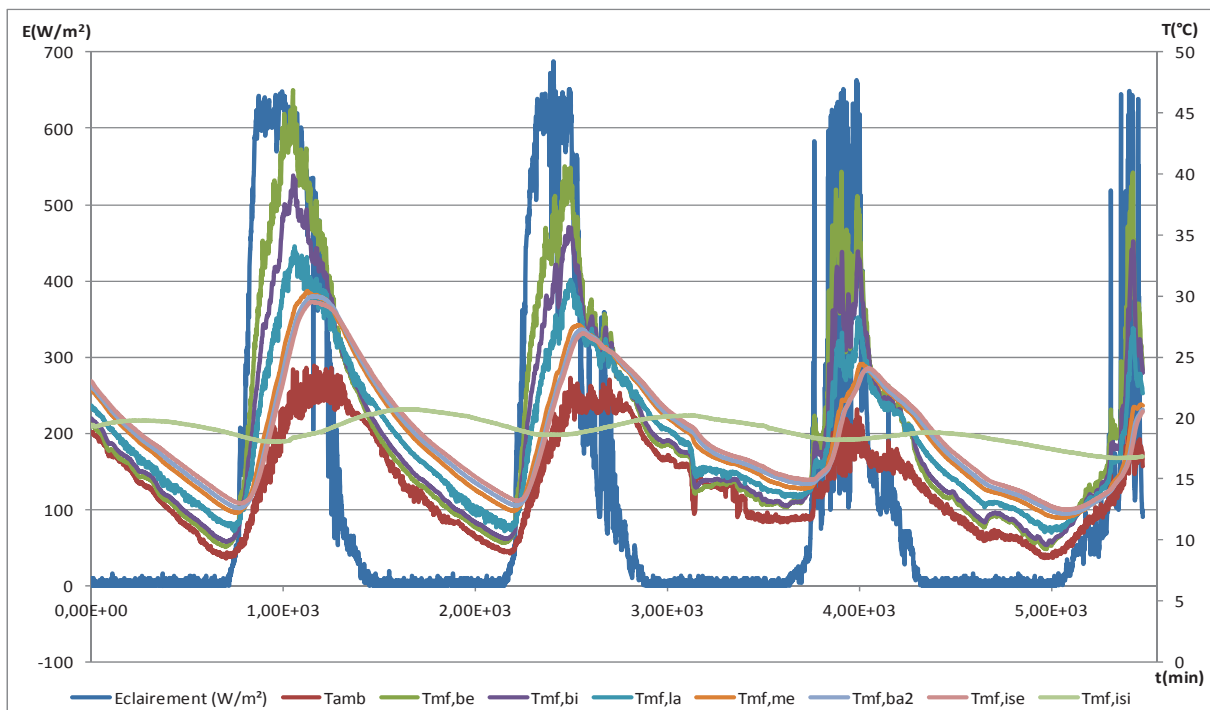


Evolution de l'éclairement et températures en mi-hauteur du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré et lame d'air épaisse ouverte (séquence C) sur plusieurs jours (du 15 au 22 mars 2011)

Lame d'air épaisse fermée

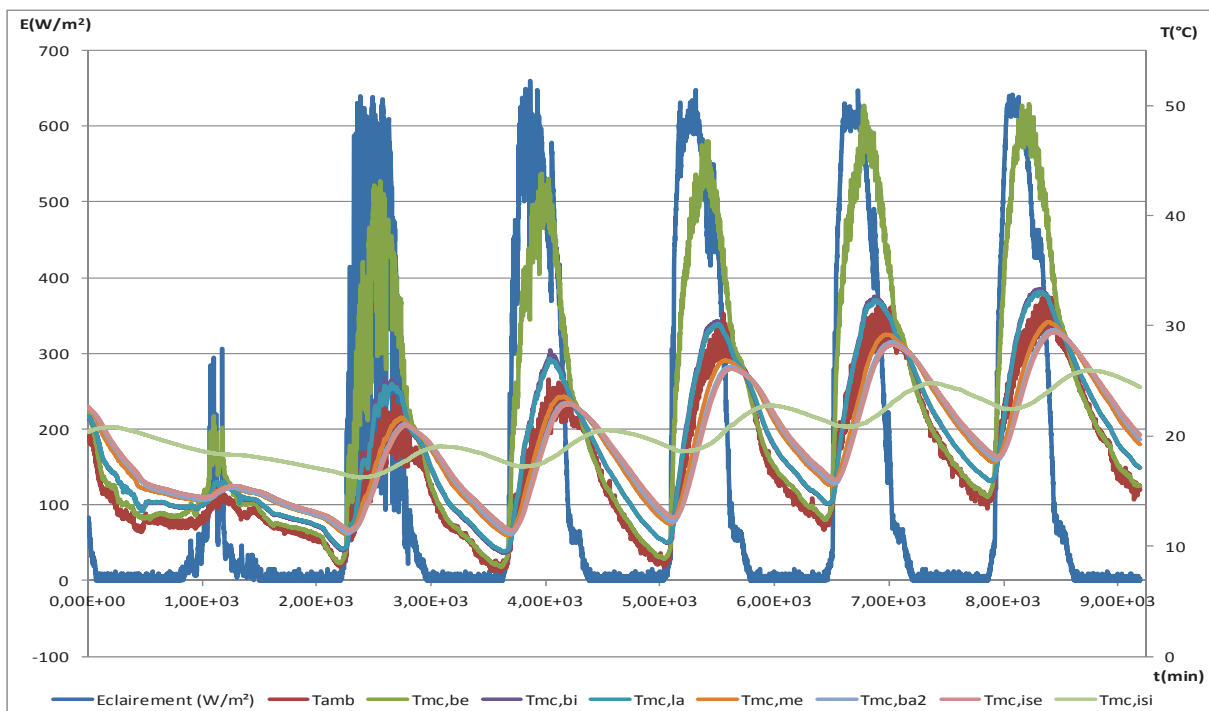


Evolution de l'éclairement et températures en mi-hauteur du dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime et lame d'air épaisse fermée (séquence C) sur plusieurs jours (du 24 au 27 mars 2011)

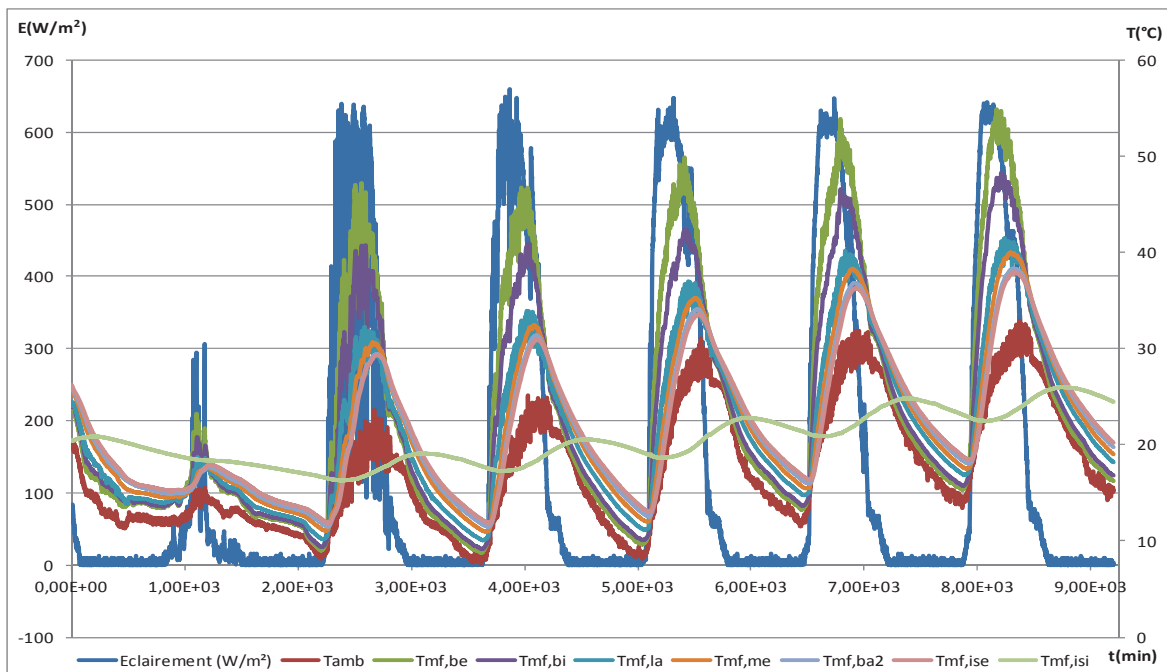


Evolution de l'éclairement et températures en mi-hauteur du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré et lame d'air épaisse fermée (séquence C) sur plusieurs jours (du 24 au 27 mars 2011)

Lame d'air mince ouverte

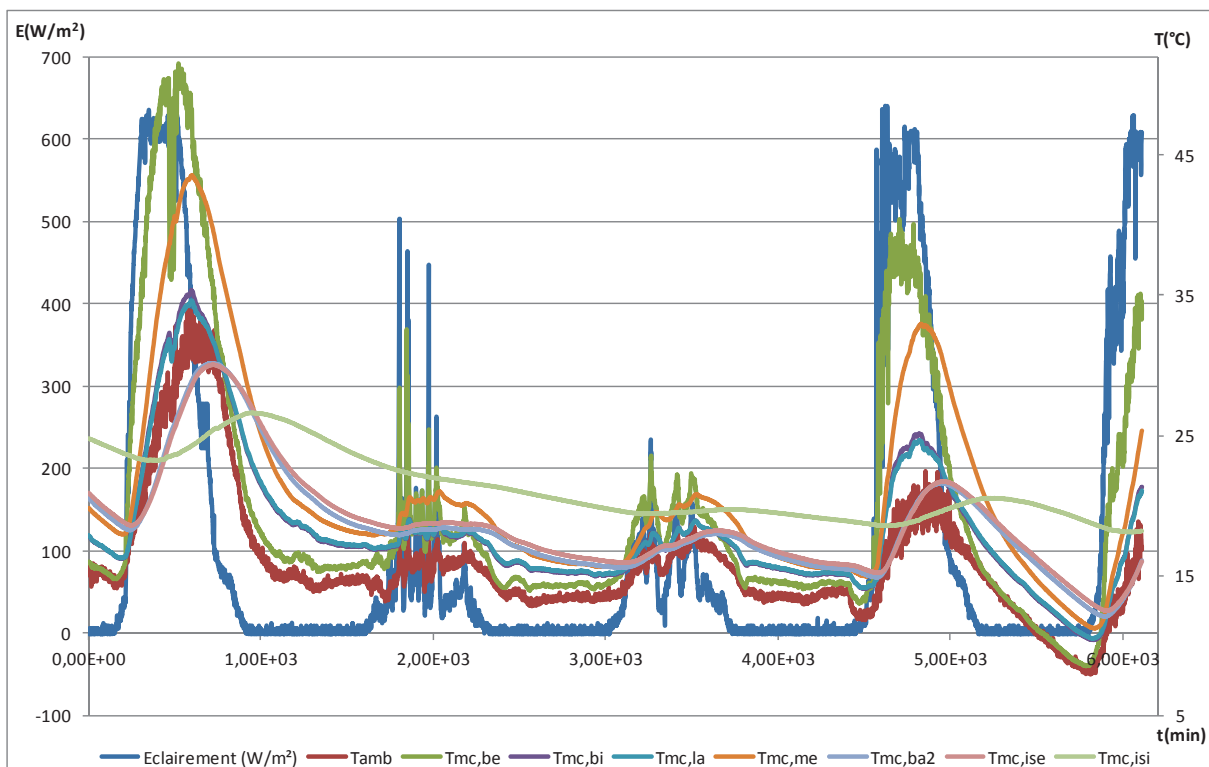


Evolution de l'éclairement et températures en mi-hauteur du dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime et lame d'air mince ouverte (séquence C) sur plusieurs jours (du 03 au 08 avril 2011)

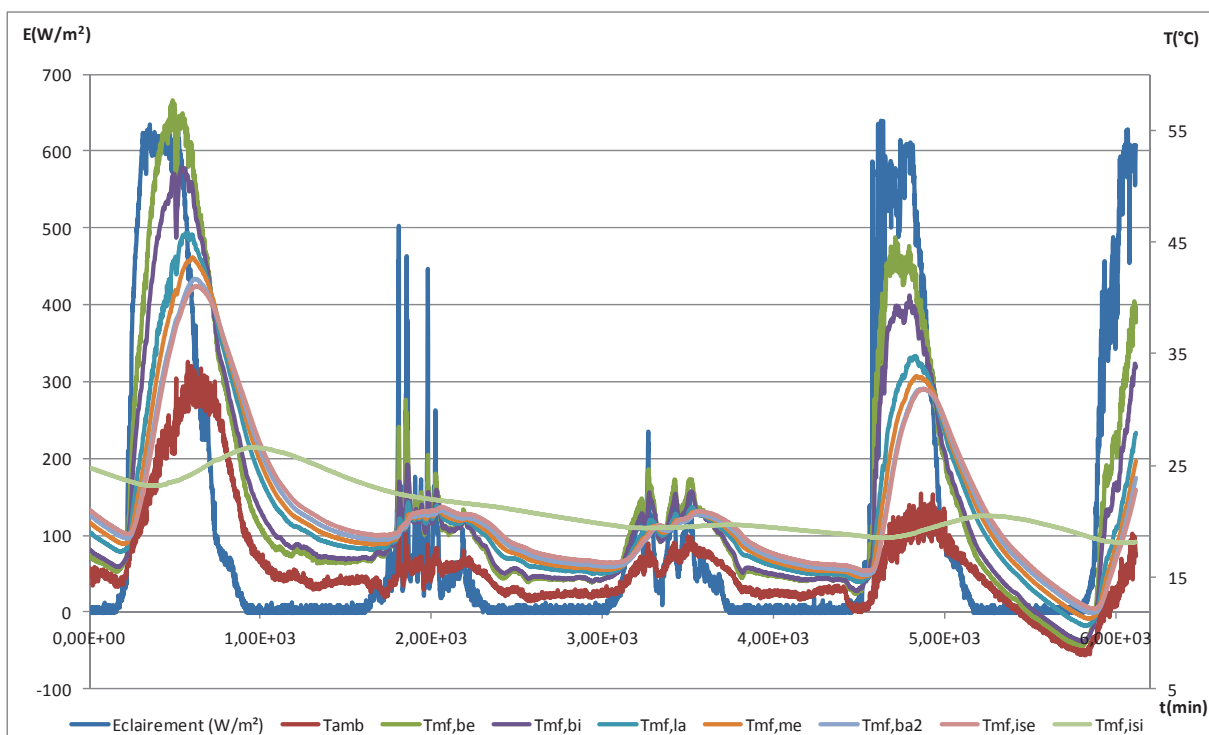


Evolution de l'éclairement et températures en mi-hauteur du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré et lame d'air mince ouverte (séquence C) sur plusieurs jours (du 03 au 08 avril 2011)

Lame d'air mince fermée



Evolution de l'éclairement et températures en mi-hauteur du dispositif de bardage avec plaque de parement en pin maritime et lame d'air mince fermée (séquence C) sur plusieurs jours (du 09 au 13 avril 2011)



Evolution de l'éclairement et températures en mi-hauteur du dispositif de bardage avec plaque de parement en aggloméré et lame d'air mince fermée (séquence C) sur plusieurs jours (du 09 au 13 avril 2011).

Résumé :

Aujourd'hui à de nombreuses études sur la thermique du bâtiment pour réduire la consommation d'énergie tout en préservant le confort des usagers sont proposées. Le travail présenté ici met en avant les performances d'une technique d'isolation active par un dispositif de bardage extérieur de ce fait soumis au rayonnement solaire incident.

L'étude expérimentale mise en œuvre a permis de caractériser les échanges thermiques à l'intérieur de la lame d'air verticale (circulante ou non circulante), qui sont la clef de ce type de dispositif, en fonction des différents paramètres retenus comme pertinents. Le terme moteur est bien évidemment l'éclairement solaire. La distance parement extérieur mur support, *i.e.* l'épaisseur de la lame d'air, conditionne un rapport d'aspect et influe donc sur la vitesse de l'air circulant ou sur le volume tampon en situation non circulante et donc sur les échanges thermiques. Enfin les caractéristiques thermiques du parement extérieur, ici une lame de pin maritime ou un bois aggloméré, impactent assez fortement sur l'évolution temporelle des différentes.

Une modélisation globale du comportement de la cheminée solaire que constitue le bardage et quelques simulations numériques ont permis de conforter ces différents résultats expérimentaux. On retiendra qu'en été, la solution optimale est un dispositif de bardage avec peu d'inertie thermique et un écoulement d'air rapide alors qu'en hiver, un dispositif avec inertie et sans écoulement contribue à assurer un bon volant thermique.

Mots clefs : Bardage - bois – isolation active - confort thermique - cheminée solaire

Abstract :

Today many studies on thermal building to reduce energy consumption while maintaining user comfort are proposed. The work presented here highlights the performance of an active isolation technique by means of exterior cladding thus subjected to solar radiation.

The experimental study has been used to characterize the heat transfers inside the vertical cavity (air circulating or not), which are the key to this type of device, depending on various parameters taken as relevant. The driving factor is of course the solar irradiance. The thickness of the air gap induces an aspect ratio and thus affects the speed of the air flowing or the buffer volume and therefore the heat exchanges. Finally, the thermal characteristics of the cladding here maritime pine or chipboard, impact quite strongly on the temporal evolution of the different temperatures.

The cladding and the vertical cavity act as a solar chimney, a global modeling of its behavior and some numerical simulations have strengthened the experimental results.

We note that in summer, the optimal solution is a device of cladding with little thermal mass and rapid air flow while in winter, a device with large thermal mass and without flow helps to ensure a good thermal flywheel.

Keywords: Cladding - wood - active insulation - thermal comfort - solar chimney.