



HAL
open science

Étude du vitrage thermochrome soumis au rayonnement solaire en physique du bâtiment

Arthur Ah-Nieme

► **To cite this version:**

Arthur Ah-Nieme. Étude du vitrage thermochrome soumis au rayonnement solaire en physique du bâtiment. Thermique [physics.class-ph]. Université de la Réunion, 2020. Français. NNT : 2020LARE0034 . tel-03131185

HAL Id: tel-03131185

<https://theses.hal.science/tel-03131185v1>

Submitted on 4 Feb 2021

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

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



Université de La Réunion

Laboratoire de **Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'Environnement et le Bâtiment**

THESE

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de La Réunion,

Spécialité **Physique du bâtiment**

ETUDE DU VITRAGE THERMOCHROME SOUMIS AU RAYONNEMENT SOLAIRE EN PHYSIQUE DU BATIMENT

Soutenue le Lundi 14 Décembre 2020

par

Arthur AH-NIEME

JURY

Georges ZISSIS	Pr., Université Toulouse III - Paul Sabatier, LAPLACE	Rapporteur
Marjorie MUSY	Directrice de Recherche, CEREMA Ouest	Rapporteuse
Etienne WURTZ*	Directeur de Recherche, CEA-INES	Examinateur
Laëtitia ADELARD	MCF HDR, Université de La Réunion, PIMENT	Examinatrice
Joseph VIRGONE	Pr., Université Claude Bernard Lyon I, CETHIL	Invité
Dimitri BIGOT	MCF, Université de La Réunion, PIMENT	Encadrant
Harry BOYER	Pr., Université de La Réunion, PIMENT	Directeur

*Président du jury

RESUME

Cette thèse présente l'étude du vitrage thermochrome (VTC) soumis au rayonnement solaire en physique du bâtiment. Ce travail de recherche s'inscrit dans la thématique de l'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment. En effet, le VTC, qui est une technologie innovante et dynamique, a la capacité de moduler sa transmission d'énergie en fonction de sa propre température. Pour les milieux tropicaux où le gisement solaire est important, ce type de vitrage peut de façon autonome, réduire significativement la transmission de chaleur à l'intérieur des bâtiments tout en maintenant une quantité de lumière naturelle suffisante pour le confort des occupants. Le but est donc de modéliser le comportement du VTC. Tout d'abord, une expérimentation unique en milieu tropical a été mise en place sur une cellule expérimentale à échelle 1 équipée d'un VTC. Il a été possible de tirer plusieurs conclusions suites aux observations : le champ de température du VTC est sensible à l'absorption du rayonnement solaire et il présente une répartition hétérogène quand des masques proches sont présents (comme dans notre cas). A partir de ces observations expérimentales, un modèle original a été proposé. Il s'agit d'une part de la formulation de la fonction qui régit la variation des propriétés thermo-optiques en fonction de la température ; et d'autre part, un modèle à discrétisation spatiale en deux dimensions sur la surface du VTC en prenant en compte les sollicitations du rayonnement solaire et des masques proches. Le modèle 2D a ensuite été implémenté dans un système global de bâtiment avec le modèle thermique 1D et le modèle d'éclairage naturel. Tous les modèles ont été intégrés dans PITAYA : plateforme pour l'analyse intégrée de la thermique et de l'éclairage naturel. Finalement, les modèles de PITAYA ont été confrontés aux mesures issues de l'expérimentation pour une validation. Les résultats de validation sur la thermique montrent que le modèle est fiable et précis. Néanmoins, les résultats en photométrie, qui sont encourageants, nécessitent d'apporter des améliorations supplémentaires au modèle.

Mots-clés : Vitrage thermochrome - Modélisation - Expérimentation - Validation - Application - Thermique - Photométrie - Eclairage naturel - Rayonnement solaire - Physique du bâtiment

ABSTRACT

This thesis deals with the study of thermochromic glazing (TCG) exposed to solar radiation in building physics. This research work is part of the building envelope energy efficiency thematic. Indeed, the TCG, which is an innovative and dynamic technology, has the capacity to modulate its energy transmission according to its own temperature. For tropical areas where there is a large amount of solar energy, this type of glazing can, on its own, significantly reduce the transmission of heat inside buildings while maintaining a sufficient amount of natural light for the comfort of the occupants. The goal is therefore to model the behaviour of the TCG. First of all, a unique experiment in a tropical environment has been set up on a scale 1 experimental cell equipped with a TCG. It was possible to draw several conclusions from the observations: the temperature field of the TCG is sensitive to the absorption of solar radiation and presents a heterogeneous distribution when close masks are present (as in our case). From these experimental observations, an original model was proposed. It is, on one hand, the formulation of the function that governs the variation of the thermo-optical properties as a function of temperature; and on the other hand, a two-dimensional spatial discretisation model on the surface of the TCG taking into account the solicitations of solar radiation and close masks. The 2D model was then implemented in a global building system with the 1D thermal model and the daylighting model. All models have been integrated into PITAYA: Platform for the integrated thermal and daylighting analysis. Finally, the PITAYA models were compared with the measurements from the experiment for validation. The results of the thermal validation show that the model is reliable and accurate. Nevertheless, the results in photometry, which are encouraging, require further improvements to the model.

Keywords: Thermochromic glazing - Modelling - Experimentation - Validation - Application - Thermal - Photometry - Daylighting - Natural lighting - Solar radiation - Building physics

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée à l'Université de la Réunion au sein du Laboratoire PIMENT. Elle a été financée via le dispositif de contrat doctoral, ce qui m'a permis aussi de pouvoir enseigner. Je tenais donc à adresser mes remerciements à tout le personnel éducatif et administratif du département Sciences du Bâtiment et Environnement sur le campus du Tampon et du département Génie Civil–Construction Durable à l'IUT de Saint-Pierre.

Je tiens à remercier l'entreprise Pleotint, qui a bien voulu collaborer sur cette thèse en m'expédiant depuis les Etats-Unis d'Amérique, les échantillons de vitrage thermochrome, qui ont servi à monter le projet expérimental.

Je voulais aussi adresser aux membres, rapporteurs et examinateurs du jury, tous mes remerciements pour avoir accepté de participer à l'évaluation de cette thèse. Par la même occasion, je remercie grandement les membres de mon comité de thèse pour avoir su me conseiller avec bienveillance pour la bonne réussite de cette thèse.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Harry Boyer, sans qui ce sujet de thèse n'aurait pas existé. Merci pour la confiance et l'autonomie accordée pour mener à bien ce travail de thèse. Merci aussi d'avoir transmis cette passion pour le code et la programmation scientifique. Je suis aussi très reconnaissant envers mon encadrant, Dimitri Bigot, qui a su m'accompagner pendant cette thèse au travers des remarques, critiques et conseils précieux. Merci à cette équipe encadrante de m'avoir fait grandir et mûrir techniquement et scientifiquement.

Ensuite, je tenais à remercier chaleureusement, l'ex-directeur du laboratoire PIMENT, Alain Bastide, pour l'accueil, les échanges constructifs et les remarques pertinentes tout au long de ces années. Je remercie aussi le nouveau directeur du laboratoire, Mathieu David, ainsi que tous les titulaires, l'équipe administrative, notamment Vanessa DIJOUX, et l'équipe technique.

J'aimerais aussi remercier les doctorants du laboratoire pour cette cohésion et ces bons moments passés à réfléchir sur l'avenir.

Je remercie toute ma famille et mes amis pour leur soutien et ces moments de joies passées ensemble, pendant ces dernières années. Mention spéciale à mon cousin Jérémy pour son aide sur l'expérimentation. Je tenais exprimer tout mon amour et à remercier particulièrement, Maman ma grande protectrice, merci d'avoir relu mon manuscrit ; Papa pour son soutien ; Mes sœurs de m'inspirer par leur courage tous les jours et mon petit Tom d'être une lumière dans ma vie. Finalement, j'aimerais me remercier d'avoir cru en moi et d'être allé jusqu'au bout surtout dans les moments de doutes. Arthur, tu as réussi et tu peux être fier de toi !

Gran mersi zot tout pou tou sak zot la aport a moin!

A la mémoire de mon Pépé Paulin

Proverbe créole :

Pa kapab lé mor san éséyé

TABLE DES MATIERES

Résumé	i
Abstract	iii
Remerciements.....	v
Nomenclature	3
Introduction Générale.....	9
Chapitre 1 Le vitrage thermochrome et son interaction avec le bâtiment.....	11
1.1 Les fenêtres dans le bâtiment.....	12
1.1.1 Les menuiseries	12
1.1.2 Les protections solaires.....	13
1.1.3 Le vitrage	14
1.1.4 Retour d'expérience des bâtiments fortement vitrés.....	18
1.2 Les vitrages intelligents	19
1.2.1 Définition.....	19
1.2.2 Les familles de vitrages intelligents	20
1.3 Revue de littérature sur le vitrage thermochrome.....	24
1.3.1 Principe de fonctionnement.....	24
1.3.2 Caractéristiques techniques du vitrage thermochrome	24
1.3.3 Fabricants.....	27
1.3.4 Etude en chimie des matériaux (échelle microscopique).....	29
1.3.5 Etude en physique du bâtiment (échelle macroscopique)	30
1.4 Conclusions et positionnement de la thèse.....	38
Chapitre 2 Expérimentation in situ du vitrage thermochrome.....	41
2.1 Introduction à l'expérimentation.....	42
2.1.1 Mise en œuvre du VTC.....	44
2.1.2 Stations météorologiques.....	50
2.1.3 Stations portables des mesures intérieures.....	52
2.2 Etude expérimentale et Analyse des résultats.....	56
2.2.1 Données des stations météorologiques	56
2.2.2 Résultats expérimentaux mesurés à l'intérieur de la cellule	59

2.3	Conclusions	66
Chapitre 3 Modélisation du comportement thermo-optique du vitrage thermochrome soumis au rayonnement.....		67
3.1	Introduction aux modèles de la physique du bâtiment	68
3.1.1	Transfert par rayonnement de courtes longueurs d'onde (solaire)	69
3.1.2	Transfert par rayonnement de grandes longueurs d'onde (infra-rouge lointain)	75
3.1.3	Transfert par convection	77
3.1.4	Transfert par conduction.....	80
3.1.5	Bilan enthalpique du volume d'air intérieur.....	82
3.1.6	Modélisation de l'éclairement naturel	85
3.2	Modélisation de la variation des propriétés thermo-optiques	92
3.3	Modélisation en 2D plane du vitrage thermochrome	96
3.4	Couplage au système bâtiment.....	105
3.5	Conclusions	108
Chapitre 4 Validation expérimentale du modèle et application		109
4.1	Introduction et Méthodologie	110
4.2	Validation thermique du modèle 2D	112
4.3	Validation globale du modèle.....	131
4.3.1	Validation thermique globale.....	131
4.3.2	Validation en éclairage naturel.....	134
4.4	Application du modèle.....	140
4.5	Conclusions	144
Conclusion générale et perspectives.....		145
	Conclusions.....	145
	Perspectives.....	146
Références		149
Annexes		159
	Annexe A : Hypothèse de simulation pour les tests de cohérences	161
	Annexe B : Fichier météo Mars2.mto	163

NOMENCLATURE

Lettres Latines

	Désignation	Unité
<i>A</i>	Matrice d'état du système thermique	
<i>a</i>	Diffusivité thermique	$m^2 \cdot s^{-1}$
<i>B</i>	Matrice des sollicitations thermique extérieures	
<i>C</i>	Coefficient dépendant des obstructions extérieures	-
<i>C_p</i>	Chaleur spécifique	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
<i>c</i>	Coefficient de pente	-
<i>DC/DE/ DI</i>	Composante directe, interne ou externe du FLJ	-
<i>E</i>	Eclairement	<i>lux</i>
<i>e</i>	Épaisseur	<i>m</i>
<i>D</i>	Longueur caractéristique	
<i>d</i>	Distance	<i>m</i>
<i>F</i>	Facteur de forme	-
<i>FLJ</i>	Facteur de lumière du jour	-
<i>Gr</i>	Nombre de Grashof	-
<i>h</i>	Coefficient d'échange radiatif ou convectif	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
<i>H</i>	Hauteur	<i>m</i>
<i>I</i>	Rayonnement thermique	$W \cdot m^{-2}$

k	Coefficient d'extinction	m^{-1}
L	Luminance	$cd.m^{-2}$
m	Coefficient de corrélation	-
N	Nombre d'éléments total	-
Nu	Nombre de Nusselt	-
n	Coefficient de corrélation	-
P	Puissance volumique	$W.m^{-3}$
Pr	Nombre de Prandtl	-
p	Coefficient de corrélation	$W.m^{-3}$
q	Paramètre de catégorie du type de vitrage	-
R	Résistance thermique	$m^2.K^1.W^{-1}$
Ra	Nombre de Rayleigh	-
S	Surface	m^2
T	Température ou vecteur température	$^{\circ}C$ ou K
t	Variable temporelle	s
U	Coefficient de transmission thermique	$W.m^{-2}.K^{-1}$
V	Volume	m^3
v	Vitesse	$m.s^{-1}$
x	Variable spatiale	m
y	Variable spatiale	m
z	Angle normalisé	-

Lettres Grecques

Symbole	Désignation	Unité
α	Absorptance totale	-
β	Angle	$^{\circ}$ ou rad
γ	Nombre de Fourier	-
$\Delta_x ; \Delta_y$	Pas d'espace	m
Δ_t	Pas de temps	s
ΔT	Différence de température	$^{\circ}\text{C}$
ε	Emissivité	-
η	Facteur de correction	-
θ	Angle	$^{\circ}$ ou rad
λ	Conductivité thermique	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
μ	Masse volumique	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ	Réflectance totale	-
τ	Transmittance totale	-
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
Φ	Flux de chaleur	W
φ	Densité de flux de chaleur	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
χ	Nombre binaire	-
Ψ	Indice de validation	%
ω	Hauteur angulaire	$^{\circ}$ ou rad
∇	Gradient	-

Exposant

Symbole	Désignation	Unité
n	Pas de temps actuel	-
$n + 1$	Pas de temps suivant	-
0	Pas de temps initial	-

Indices

Symbole	Désignation	Symbole	Désignation
<i>a</i>	Absorbé	<i>j</i>	Indice de position du nœud sur l'axe y
<i>ac</i>	Activité	<i>moy</i>	Moyen (ne)
<i>ae</i>	Air extérieur	<i>obs</i>	Obstruction
<i>ai</i>	Air intérieur	<i>p</i>	Paroi
<i>ar</i>	Arrière	<i>ps</i>	Poussière
<i>av</i>	Avant	<i>r</i>	Réfléchis
<i>bh</i>	Bande d'hystérésis	<i>rad</i>	Radiatifs
<i>CLO</i>	Courte longueur d'onde	<i>rc</i>	Radiatif du ciel
<i>c</i>	Convectif	<i>ri</i>	Radiatif intérieur
<i>ca</i>	Cadre (Menuiserie)	<i>rm</i>	Radiante moyenne
<i>cde</i>	Conductif extérieur	<i>sol</i>	Sol
<i>cdi</i>	Conductif intérieur	<i>s</i>	Solaire
<i>ce</i>	Convectif extérieur	<i>se</i>	Surface extérieure
<i>ci</i>	Convectif intérieur	<i>si</i>	Surface intérieure
<i>dir</i>	Direct	<i>t</i>	Transition
<i>dif</i>	Diffus	<i>tr</i>	Transmis
<i>ext</i>	Extérieur (e)	<i>ts</i>	Tache solaire
<i>env</i>	Radiatif de l'environnement	<i>tot</i>	Totale

<i>GLO</i>	Grande longueur d'onde	<i>v</i>	Vitrage
<i>h</i>	Hystérésis	<i>vis</i>	Visible
<i>hor</i>	Horizontal (e)	<i>z</i>	Zone
<i>int</i>	Intérieur (e)	<i>zh</i>	Zénithal
<i>inc</i>	Incident	<i>0</i>	Incidence nulle
<i>i</i>	Indice de position du nœud sur l'axe x		

INTRODUCTION GENERALE

La fenêtre en architecture est une ouverture sur le monde alentour et l'environnement extérieur. Sans fenêtre il n'y aurait pas d'architecture car c'est à travers elle que la lumière passe et rend visible ce qui est à l'intérieur. La fenêtre a donc un caractère essentiel à l'architecture. On peut remonter très tôt pour voir l'apparition des premières ouvertures dans les parois opaques, dès le premier siècle avant notre ère. Au départ cela consistait juste à un orifice dans un mur de forme rectangulaire, c'est la lucarne et de forme ronde pour les oculi. Ces sortes d'ouvertures ont servi très tôt à faire entrer de la lumière. Avec les modes de vies et d'usages du bâtiment qui changent, les fenêtres ont connu elles aussi une évolution. La fonction de départ de la fenêtre aussi a changé avec l'essor de l'architecture moderne et de ces bâtiments fortement vitrés. Ces bâtiments sont devenus le symbole de la richesse et de l'esthétisme reproduits à travers le monde, même dans des climats non adaptés pour ce genre d'architecture. En effet, dans les milieux tropicaux où le gisement solaire est plus important, le vitrage, la partie transparente des fenêtres, joue un rôle important dans la transmission de la chaleur. Cette chaleur supplémentaire à l'intérieur du bâtiment est à l'origine de la surchauffe et elle affecte directement le confort des occupants. Dans la grande majorité des cas, pour pallier à ces problèmes, les concepteurs sont obligés d'avoir recours à des systèmes actifs de rafraîchissement comme la climatisation, qui est énergivore et impacte l'environnement.

Dans le contexte mondial de crise environnementale et énergétique actuel, le besoin d'avoir des bâtiments durables, sobres en énergie et ayant le moins d'impact sur l'environnement devient une nécessité et un choix stratégique pour les années à venir. Au niveau local, à La Réunion, un territoire insulaire en milieu tropical, l'objectif est d'atteindre l'autonomie énergétique et de développer des solutions résilientes de conception durable des bâtiments, et ainsi faire face au changement climatique. Plusieurs problématiques se posent dans ce cas, comment limiter les surchauffes de manière passive et quelles sont les technologies de vitrages performants les plus adaptées au milieu tropical ? Comment intégrer ces solutions pour améliorer l'éclairage naturel ? Quel est l'impact de ces dispositifs sur les économies d'énergies, et sur le confort thermique et visuel ? Pour répondre à ces questions, les études récentes se sont focalisées sur les performances énergétiques des parois, plus particulièrement sur les vitrages performants et énergétiquement efficaces. En parallèle, ces dernières années, le développement des vitrages dans le bâtiment a connu un essor, tant son potentiel en économies d'énergie est crucial : au départ du simple vitrage clair, vers les multiples couches de verres, en passant par les revêtements à contrôle solaire ou à faible émissivité et l'utilisation de gaz inertes pour limiter le transfert d'énergie. A travers ce développement, de nouvelles technologies font leur apparition, comme par exemple les vitrages intelligents. Ces derniers offrent un changement de paradigme dans la conception des bâtiments car ils ne sont plus statiques mais dynamiques. Parmi eux, le vitrage thermochrome semble être le plus adapté aux climats chauds et humides. C'est une technologie de vitrage qui a la capacité de changer de couleur

ou de teinte quand un changement de sa température s'opère. C'est dans le cadre de cette thèse, qui s'inscrit dans la thématique de l'efficacité énergétique en physique du bâtiment, que nous avons décidé d'étudier le vitrage thermochrome. Les objectifs de cette thèse sont ainsi de :

- Modéliser le comportement du vitrage thermochrome en présence de rayonnement solaire ;
- Intégrer les modèles élaborés à des codes de calculs de simulation thermique et photométrique de bâtiments ;
- Valider expérimentalement les modèles proposés.

Dans le premier chapitre, une revue de bibliographie sera présentée sur les études internationales en chimie des matériaux et en physique du bâtiment sur le vitrage thermochrome. De plus, il sera mis en évidence l'intérêt de ce type de vitrage pour les milieux chauds avec un grand besoin de rafraîchissement. Ensuite, le besoin d'amélioration des modèles, ainsi que leurs limites dans les outils de calcul existants sera mis en lumière. Ce chapitre permettra de positionner la thèse.

Dans le second chapitre, il sera abordé l'étude expérimentale réalisée sur une cellule test in situ à échelle 1 équipée d'un vitrage thermochrome. L'observation des résultats expérimentaux mettra en évidence le fonctionnement du comportement du vitrage soumis au rayonnement solaire. Les conclusions de ces observations vont orienter les choix proposés de modélisation pour l'amélioration du modèle.

Dans le troisième chapitre, il sera traité de la modélisation du comportement du vitrage thermochrome. Dans un premier temps, il sera exposé la modélisation théorique des phénomènes de transfert à travers un vitrage classique, puis il sera abordé les modèles de variations des propriétés thermo-optiques. Dans un second temps, le chapitre traitera de la modélisation en deux dimensions et de la répartition des sollicitations sur la surface du vitrage thermochrome. Enfin, un couplage à système global de simulation bâtiment sera proposé.

Dans le quatrième chapitre, il sera abordé la validation expérimentale des modèles proposés au chapitre 3 avec les résultats des mesures du chapitre 2. Cette étape permettra de juger la fiabilité et la précision des modèles. Pour finir, il sera effectué une application comparative du modèle validé dans cette thèse avec celui du logiciel EnergyPlus.

Chapitre 1 LE VITRAGE

THERMOCHROME ET SON

INTERACTION AVEC LE BATIMENT

Ce chapitre aura trois objectifs. Premièrement, il présentera les différents types de vitrages dynamiques et plus particulièrement le vitrage thermochrome. Deuxièmement, il passera en revue la littérature scientifique sur le sujet pour montrer l'intérêt et les avantages des vitrages thermochromes pour les climats les plus chauds avec un grand besoin de rafraîchissement. Troisièmement, il permettra de présenter les modèles existants ainsi que leurs limites dans les codes de calculs, et ce afin de se positionner sur une amélioration potentielle.

1.1 LES FENETRES DANS LE BATIMENT

Un système de fenestration ou de fenêtre est un terme architectural pour désigner la disposition des baies ou des ouvertures sur les façades du bâtiment (parois verticales ou inclinées), comme par exemple une fenêtre, une fenêtre de toit (skylight), une porte ou une lucarne.

La fenêtre, qui est l'un des éléments les plus importants dans l'architecture des bâtiments, a pour rôle principal de fournir de la lumière du jour et une vue sur l'extérieur (Carmody et al., 2004). Elle est aussi essentielle pour l'isolation acoustique, le contrôle de la qualité de l'air, la durabilité et l'isolement au feu, la sécurité, la continuité entre l'intérieur et l'extérieur, le contrôle solaire et l'isolation thermique. La fenêtre peut être fixe, ou comporter des ouvertures mobiles permettant l'entrée d'air. Elle est composée, généralement, d'une menuiserie, de vitrages et de dispositifs de protection solaire extérieurs ou intérieurs.

Les fenêtres jouent un rôle essentiel sur le comportement énergétique du bâtiment par 4 mécanismes de transferts :

- Transfert thermique (conduction et convection) ;
- Transfert du rayonnement solaire ;
- Transfert de la lumière naturelle ;
- Transfert de masse par infiltration.

Néanmoins, ces effets énergétiques des fenêtres peuvent être minimisés ou maximisés en mettant en place des stratégies de contrôle de ces mécanismes.

1.1.1 Les menuiseries

On retrouve dans les menuiseries composant les fenêtres :

- Le dormant : cadre fixe de la fenêtre ;
- Le châssis : cadre, fixe ou ouvrant, rapporté dans un dormant et recevant un vitrage ou un élément de remplissage plein ou à claire-voie.

Les menuiseries de fenêtre sont principalement fabriquées en trois matières principales, le bois, le métal et les polymères, chacun avec ses avantages et ses inconvénients. Tout d'abord, le bois a une bonne intégrité structurelle et une bonne isolation thermique mais une faible résistance aux aléas climatiques. Ces derniers entraînent souvent des pathologies liées à la présence d'humidité et des dégradations organiques (champignons et insectes). Ensuite, le métal est durable et a d'excellentes caractéristiques structurelles mais de très faibles performances thermiques. Le métal le plus utilisé

pour fabriquer les menuiseries de fenêtre est l'aluminium. Cela s'explique par le fait que l'aluminium s'usine facilement, qu'il est très peu couteux et qu'il a une faible masse. Néanmoins, ce matériau a une conductivité thermique environ 1000 fois supérieure à celle du bois ou du polymère. Il est possible d'améliorer ses performances thermiques en ajoutant des rupteurs thermiques (non métalliques) entre les parties du dormant exposées à l'extérieur et celles à l'intérieur. Pour finir, les menuiseries en polymère sont faites à partir de vinyle extrudé (PVC¹) ou de fibre de verre pultrudé (polyester de verre renforcé). On peut comparer leurs performances thermique et structurelle à celles du bois.

Les fabricants combinent parfois les matériaux par revêtement ou thermolaquage pour améliorer la durabilité, les performances thermiques ou l'esthétique des fenêtres (par exemple un cadre en bois recouvert d'aluminium ou PVC recouvert d'aluminium, ...).

1.1.2 Les protections solaires

Les protections solaires des fenêtres sont essentiellement en bois, en métal, en plastique ou en tissus (par exemple les rideaux) et parfois en béton (débord de toiture). Elles peuvent être fixes, mobiles ou projetables. Elles peuvent se retrouver à l'extérieur ou à l'intérieur et dans certains cas internes entre deux couches de verres. Des exemples constructifs les plus souvent utilisés dans les bâtiments d'habitation sont les volets battants extérieurs, ou encore, dans les bâtiments de bureaux, les stores intérieurs. On peut aussi y inclure de manière non exhaustive les volets déroulants, projetables ou persiennés, les débords de toiture, les auvents, les rideaux, les lames orientables, les brises soleil et parfois des combinaisons de ces derniers. Sur la Figure 1-1, on peut observer des exemples de protections solaires.

¹ Polychlorure de Vinyle

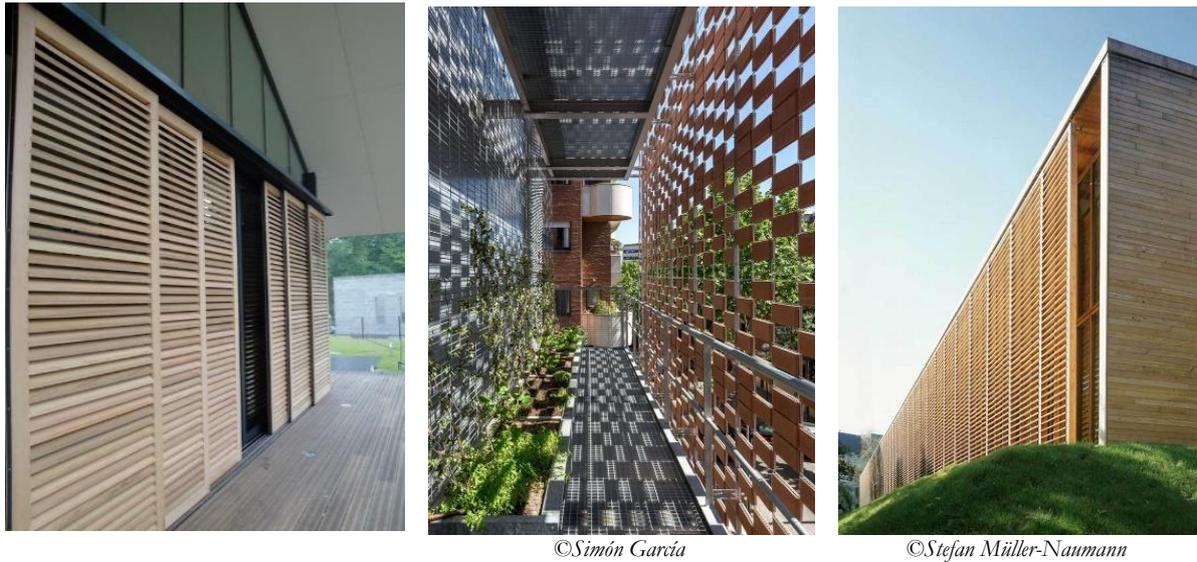


Figure 1-1 : Différents types de protections solaires

Les protections solaires sont disponibles dans une large gamme de produits variés et divers au niveau de l'apparence et de la performance énergétique. Celles situées à l'extérieur ont une meilleure capacité à réduire les gains solaires mais celles intérieures sont plus facilement maniables et ajustables par les occupants.

1.1.3 Le vitrage

Le vitrage est la partie semi transparente de la fenêtre. C'est la partie la plus importante car il assure au moins une des deux fonctions principales de la fenêtre, c'est-à-dire l'admission de lumière naturelle et la vision sur l'extérieur. Le rayonnement solaire passant d'un matériau transparent à un autre est en partie transmis et réfléchi à l'interface entre les deux milieux comme sur la Figure 1-2. De plus, une fraction de ce rayonnement, en traversant l'un des milieux, est absorbé dû à l'absorptivité du matériau. Les derniers qui n'absorbent pas totalement le rayonnement, comme le verre, sont classés comme (semi-) transparents ou translucides. Les vitrages translucides montrent une capacité à diffuser la lumière, à tel point que les images d'objets vus à travers sont flous. Les parois opaques ne transmettent aucune lumière perceptible.

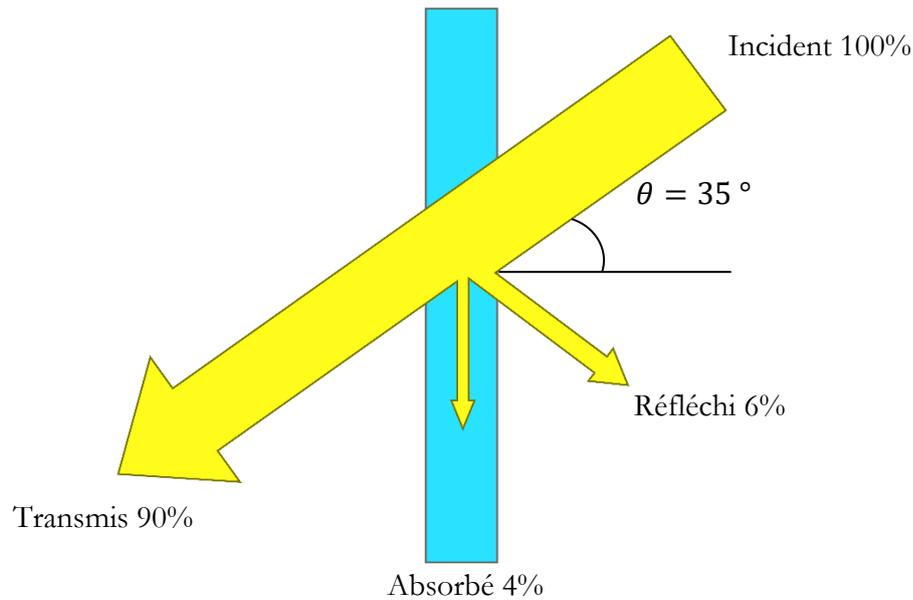


Figure 1-2 : Répartition du flux rayonnement solaire incident (en %) pour une paroi semi transparente

Les fenêtres peuvent comporter une seule couche de vitrage ou plusieurs, comme on peut le voir sur la Figure 1-3. Celles qui en possèdent plusieurs, sont hermétiquement scellées, on les appelle les vitrages isolants. Les vitrages sont séparés par des intercalaires et sont remplis par des gaz (principalement de l'air, de l'argon, du krypton, du xénon, ou un mélange de ces derniers).

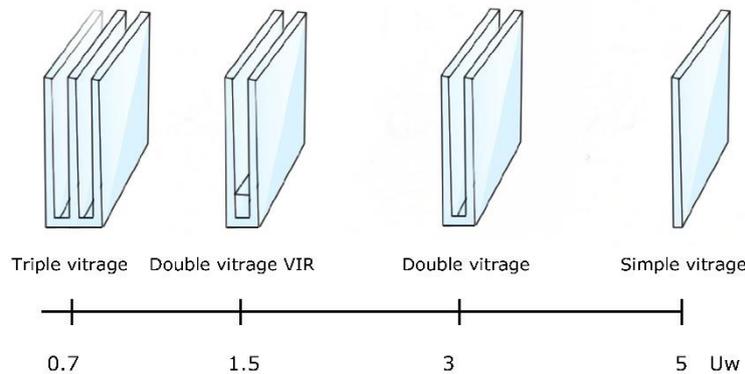


Figure 1-3 : Différents type d'assemblage de couches de verre en fonction du coefficient de transmission thermique, U_w , (en $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$)

Le matériau le plus commun pour le vitrage est le verre. De nos jours, le type de verre le plus couramment utilisé dans le bâtiment est le verre sodocalcique². Néanmoins, pour le vitrage, on peut aussi retrouver l'utilisation de certains plastiques. Le vitrage peut être clair, teinté, avec revêtement, feuilleté, à motifs, ou dépoli (translucide).

Le développement des vitrages dans le bâtiment a connu un essor, tant son potentiel en économies d'énergies (EdE) est crucial : au départ du simple vitrage clair, vers les multiples couches de verres, en passant par les revêtements à faibles émissivités et l'utilisation de gaz inertes pour limiter le

² Famille de verres à base de silice, de calcium et de sodium.

transfert d'énergie. On retrouve donc sur le marché cette nouvelle génération de vitrages performants.

On peut regrouper les technologies de vitrages performants en fonction de leur capacité à contrôler les mécanismes de transfert (de chaleur, de rayonnement et de masse). Comme par exemple sur la Figure 1-4, ci-dessous :

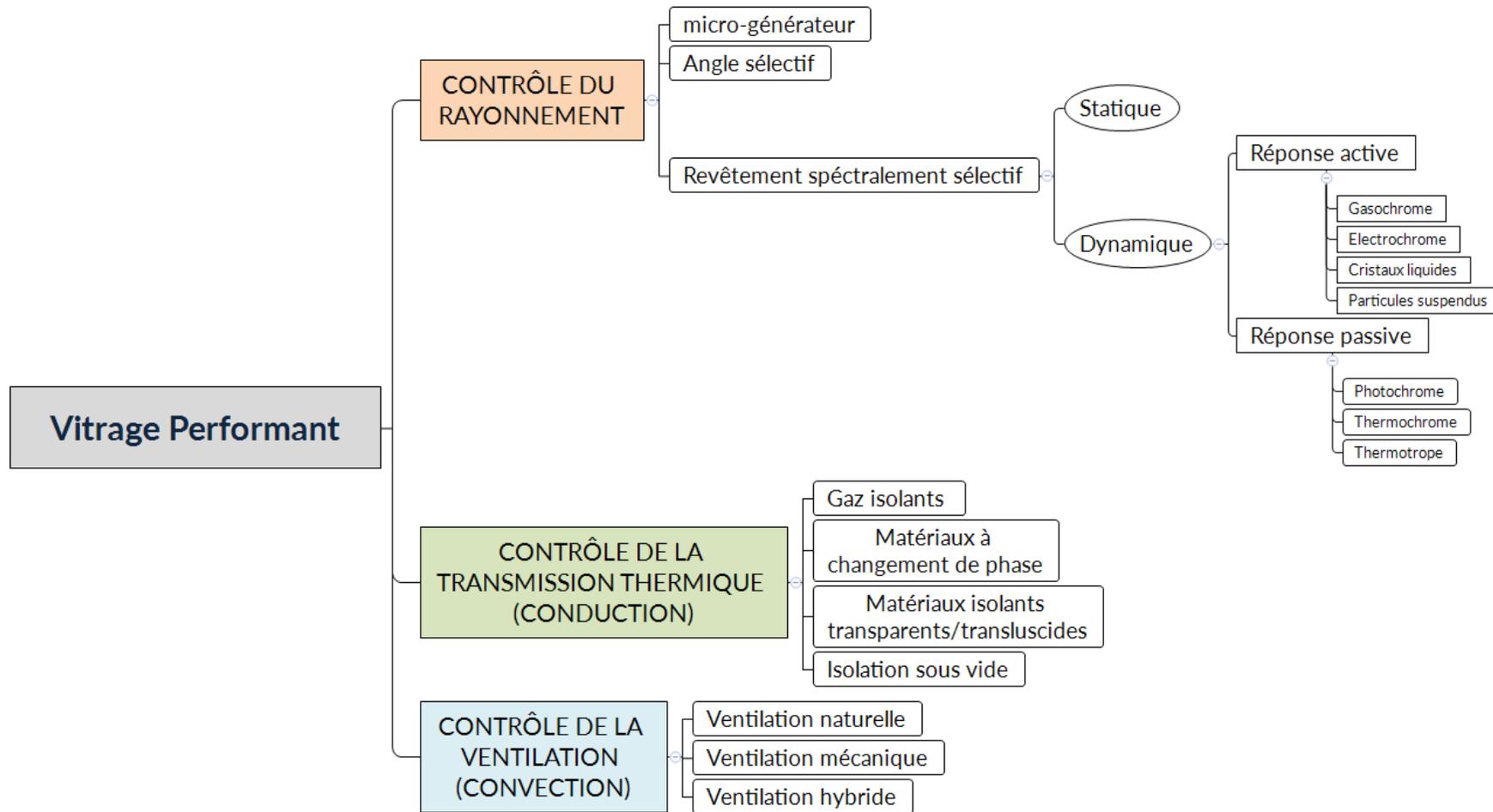


Figure 1-4 : Vitrages performants selon leur mode de contrôle de mécanisme de transfert

1.1.4 Retour d'expérience des bâtiments fortement vitrés

Dans l'architecture moderne, le vitrage a une place prépondérante tant il possède un intérêt pour assurer la vue et l'admission de la lumière naturelle. Le problème est que les grandes surfaces vitrées ramènent aussi beaucoup de perturbations en termes thermique et énergétique, surtout pour les milieux tropicaux avec un gisement solaire important. Sur la Figure 1-5, voici des exemples de bâtiments de grandes hauteurs entièrement vitrés en milieu tropical.

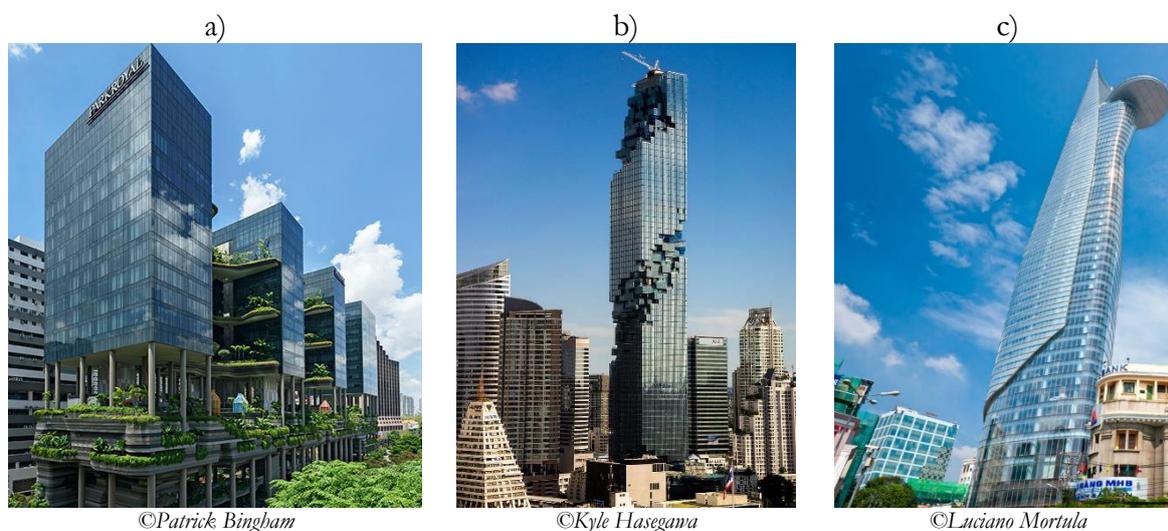


Figure 1-5 : Bâtiments fortement vitrés (a) : Singapour, (b) Bangkok, (c) Hô Chi Minh

Dans une conception classique des bâtiments, on ne prend pas en compte l'impact sur l'environnement et on ne cherche pas à maîtriser ses dépenses énergétiques. Il en résulte une conception où les besoins sont assurés uniquement par l'intervention de systèmes actifs, comme la climatisation ou le chauffage. Au contraire, dans la conception bioclimatique durable, on cherchera à réduire au maximum son impact et à être le plus sobre en énergie. Une grande partie des besoins (voir tous) est assurée par le potentiel qu'offre l'environnement de manière passive. En milieu tropical, mettre en synergie grandes surfaces vitrées et efficacité énergétique, est un vrai défi pour les bâtiments bioclimatiques et durables. Dans la plupart du temps, il en résulte la mise en place de protections solaires extérieures déportées avec un choix d'ouverture associée, favorisant la ventilation naturelle passive. Néanmoins, il existe des cas de construction où l'utilisation de protections solaires est limitée voire impossible. Les raisons peuvent être multiples :

- Façade extérieure protégée (bâtiment ABF) ;
- Maintien d'une vue directe et dégagée entre l'intérieur et l'extérieur (Aérogare, showroom, devanture de magasin, ...) ;
- Obstruction extérieure ;

- Volonté du maître d'ouvrage (esthétisme).

Dans ces cas, le concepteur se retrouve restreint. Il reste le choix de ramener la protection solaire sur le vitrage ou à l'intérieur (store). Si la protection solaire doit être sur le vitrage, le revêtement ou film doit répondre aux exigences énergétiques et de confort. Or, la grande majorité des films de protection solaire ne le permettent pas. En effet, pour limiter la transmission du rayonnement solaire et de chaleur vers l'intérieur, ces revêtements doivent avoir des propriétés de faible transmission solaire, y compris en transmission de la lumière naturelle. Cela pose donc un conflit entre trop de chaleur et trop peu de lumière naturelle. C'est pour répondre à ce défi que depuis une dizaine d'années les chercheurs ont commencé à s'intéresser à de nouveaux types de vitrages dits « intelligents » (Cuce and Riffat, 2015).

1.2 LES VITRAGES INTELLIGENTS

Nous allons ici nous intéresser à un type de vitrage innovant dit « intelligent » ou « dynamique » et étudier son application aux bâtiments dans les milieux tropicaux.

1.2.1 Définition

Le vitrage intelligent désigne la technologie qui donne à un vitrage la capacité de changer ses propriétés physiques, comme la transmission visible ou la transmission sur le spectre solaire, en réponse à un courant électrique ou un changement des conditions de l'environnement (Baetens et al., 2010). Ce type de vitrage adaptatif a ainsi la particularité de limiter les apports solaires tout en favorisant l'apport d'éclairage naturel (Loonen et al., 2013). Dans la littérature anglo-saxonne, on les retrouve sous les noms décrits dans le Tableau 1-1.

Tableau 1-1 : Désignation anglo-Saxonne et française pour le vitrage intelligent

Désignation anglo-saxonne	Désignation française
Smart glazing	Vitrage intelligent
Switchable glazing	Vitrage commutable
Dynamic glazing	Vitrage dynamique

Les vitrages intelligents offrent ainsi un nouveau paradigme où les entités composant les bâtiments ne sont plus statiques mais sont capables de s'adapter dynamiquement aux besoins et aux

conditions extérieures. La prise en compte de ces nouveaux matériaux change complètement la façon de concevoir les bâtiments et répondent aux enjeux actuels d'efficacité énergétique et de confort.

1.2.2 Les familles de vitrages intelligents

Il existe plusieurs types de vitrages intelligents, qui peuvent être classés de la manière suivante :

- Les cristaux liquides (Gardiner et al., 2009) ;
- Les particules suspendues (Ghosh et al., 2016) ;
- Les vitrages thermotropes (Silva et al., 2016) ;
- Les vitrages chromiques (Granqvist, 1990).

1.2.2.1 Les cristaux liquides et les particules suspendues

Le vitrage à cristaux liquides, en présence d'un champ électrique, change l'orientation de ses molécules (ou cristaux), ce qui permet de modifier sa transmission énergétique. Hors tension, les cristaux sont désorganisés aléatoirement et diffractent la lumière incidente, le vitrage se trouve donc dans un état translucide. Quand on applique un champ électrique, les cristaux vont s'aligner et le vitrage sera de nouveau dans un état transparent.

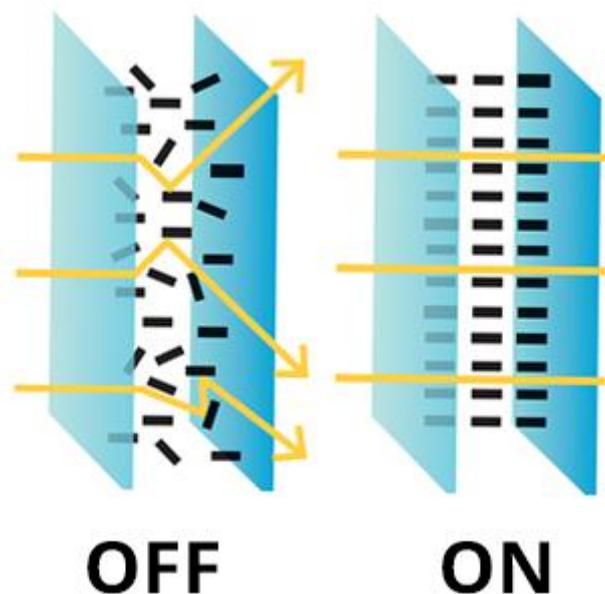


Figure 1-6 : Dispositions des cristaux liquides – mode Off et On

Cependant, cette technologie requiert une puissance continue et se dégrade en présence des rayons UV sur le long terme (Baetens et al., 2010).

Les particules suspendues fonctionnent comme les cristaux liquides. Les particules actives s'organisent différemment si on applique un champ électrique ou non.

Ces deux dernières technologies ont été développées à l'origine pour l'affichage d'écran (par exemple les écrans LCD³). Aujourd'hui, dans la construction, grâce notamment à leur rapidité d'exécution, elles trouvent leur place plutôt pour les vitrages intérieurs, pour créer des ambiances intimistes, à usages différents ou pour séparer des espaces (p. ex. pièce privatisée, salle de bain, etc). Elles font partie de la famille des vitrages dynamiques à réponse active.

• Les vitrages thermotropes

Le vitrage thermotrope change sa transmission de l'énergie en réponse à la température et passe d'un état transparent à un état translucide. Le principe est de placer entre deux couches de vitrages un hydrogel qui change de propriétés physiques en fonction de la température. Il sera donc classé dans la catégorie des vitrages à réponse passive.

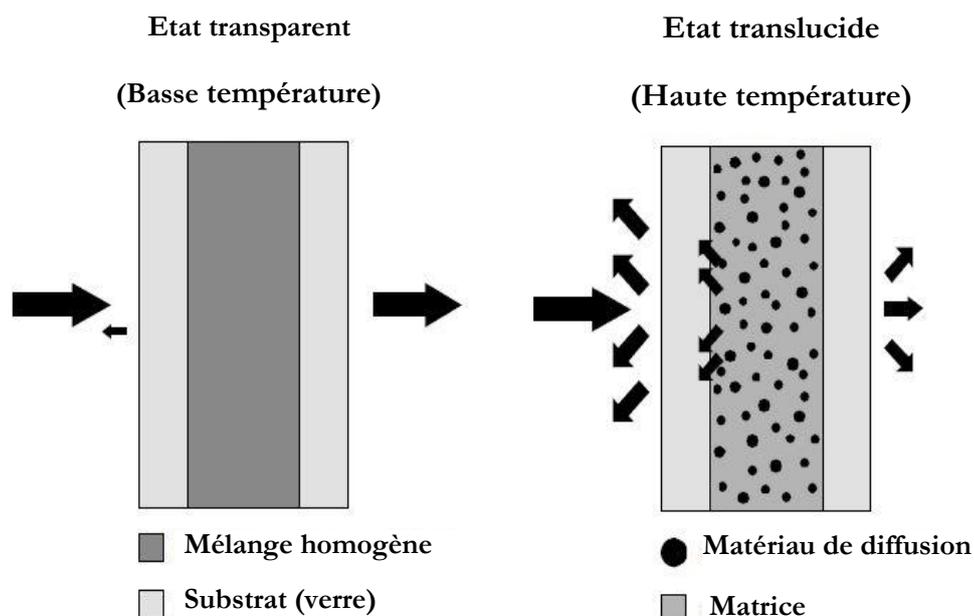


Figure 1-7 : Phases de transition et réarrangement des molécules dans la matrice du vitrage thermotrope (reproduit de Nitz et Hartwig, 2005)

Comme on peut le voir sur la Figure 1-7, quand la température augmente, les matériaux de diffusion dans la matrice d'hydrogel se dispersent et vont rendre le vitrage translucide.

Comme le vitrage est en position verticale, l'effet de la gravitation sur l'organisation des matériaux de diffusion ne pose pas de problème technique (Watanabe, 1998) et les mesures effectuées par

³ Liquid Crystal Display

(Nitz et Hartwig, 2005) montrent que la pénétration de la lumière naturelle est possible à travers le vitrage thermotrope.

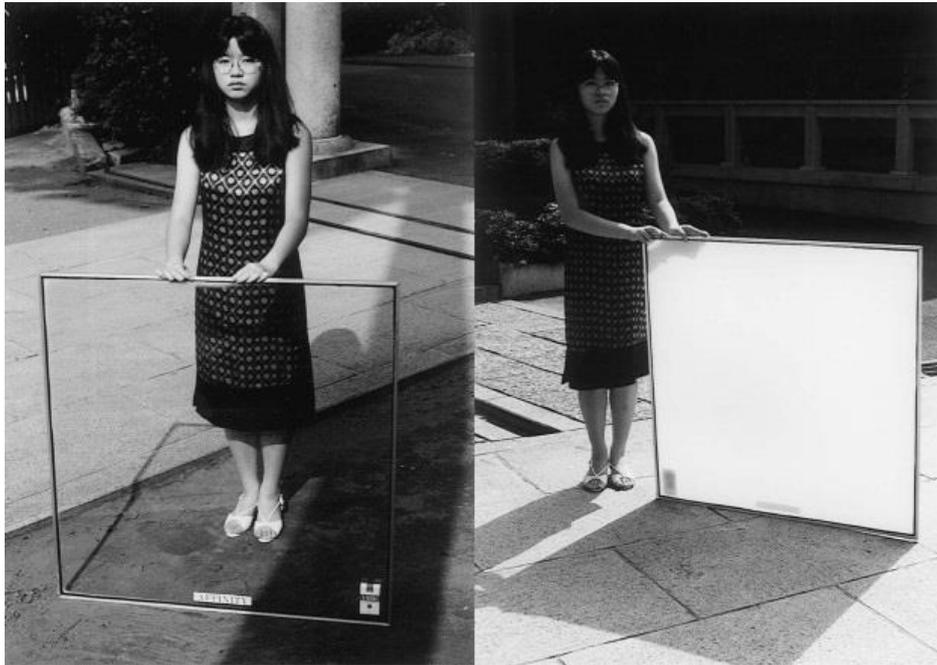


Figure 1-8 : Vitrage thermotrope : état transparent (à gauche) et état translucide (à droite) (Watanabe, 1998)

Comme on peut l'observer sur la Figure 1-8, l'état translucide de ce vitrage (image de droite) ne permettant plus d'assurer la vision sur l'extérieur, son utilisation comme fenêtre de l'enveloppe de la construction peut devenir un inconvénient pour les occupants. D'autres applications sont à explorer pour le bâtiment, par exemple en toiture ou en protection solaire (Nitz et Hartwig, 2005).

1.2.2.2 Les matériaux chromiques

Les matériaux chromiques (avec changement de couleur) passent d'un état clair à un état teinté (et réversiblement) en réponse à des stimuli. L'état clair est l'état de transmittance le plus élevée et l'état teinté est l'état de transmittance le plus faible (Figure 1-9). Dans tous les cas, la propriété semi transparente reste vraie, c'est-à-dire l'état que la vision à travers est toujours assurée.

On peut les classer en 2 catégories selon leur mode de réponse :

- Photochrome : réagit à l'intensité lumineuse (Yamazaki et al., 2015) ;
 - Thermochrome : réagit à la chaleur (Li et al., 2012) ;
 - Electrochrome : réagit à une tension électrique (Selkowitz et al., 1994) ;
 - Gasochrome : réagit à l'injection d'un gaz (Feng et al., 2016).
- } Réponse **passive**
- } Réponse **active**

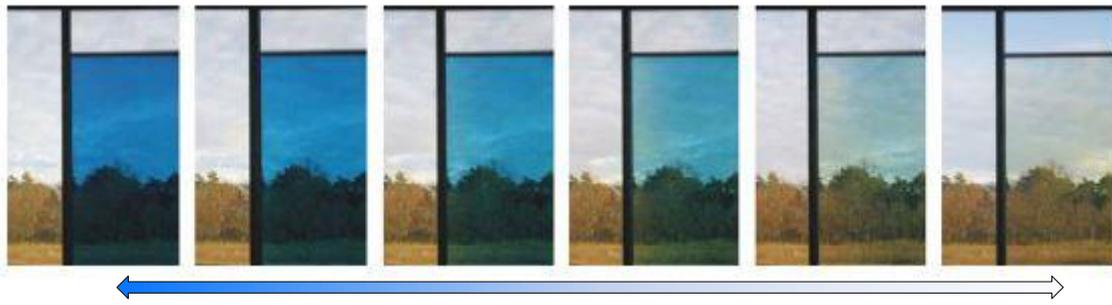


Figure 1-9 : Séquence de changement d'un état clair à un état teinté pour un vitrage électrochrome (Baetens et al., 2010)

Les technologies de vitrages dynamiques à réponse active sont contrôlées électriquement. Le contrôle peut être manuel ou automatisé. Leurs applications sont variées, comme par exemple pour des rétroviseurs d'automobile, des vitrages dans l'aviation ou dans les bâtiments. Les technologies de vitrages dynamiques à réponse passive sont autonomes et s'adaptent aux conditions extérieures. Leurs applications sont principalement les verres de vue (photochrome) et le bâtiment (thermochrome).

En particulier, le vitrage thermochrome présente un intérêt dans la conception bioclimatique et durable du fait de sa réponse passive donc non consommatrice d'énergie. Par ailleurs, il permet de garder la vision sur l'extérieur et il a la propriété de moduler l'admission de la lumière naturelle. Dans des lieux aux climats chauds et à fort gisement solaire, cette technologie est extrêmement prometteuse car elle a la capacité à limiter la transmission de la chaleur du soleil. C'est pour cela que nous l'avons choisi comme sujet d'étude de cette thèse, avec pour environnement tropical l'île de la Réunion.

Dans la suite de chapitre, il sera présenté une revue de littérature sur le vitrage thermochrome d'un point de vue microscopique pour comprendre son fonctionnement chimique et d'un point de vue macroscopique pour comprendre son interaction physique avec le bâtiment. Cette revue de littérature nous permettra de mettre en évidence l'intérêt et le potentiel du vitrage thermochrome pour les climats chauds, et aussi de pointer les limites sur les modèles de comportement dans les codes de calcul existants pour pouvoir se positionner sur une potentielle amélioration.

A l'heure actuelle, nos travaux sont les seuls effectués pour la zone tropicale, 'A' selon la classification de Köppen-Geiger (Aburas et al., 2019).

1.3 REVUE DE LITTERATURE SUR LE VITRAGE THERMOCHROME

1.3.1 Principe de fonctionnement

Reporté pour la première fois par Morin (1959), le thermochromisme est la capacité d'une substance à changer ses propriétés thermo-optiques, réversiblement, quand un changement de température s'opère. Le Vitrage Thermochrome (VTC) a donc la capacité de contrôler le rayonnement solaire. En effet, l'énergie solaire absorbée par le VTC contribuera à son échauffement et ainsi limitera sa transmission solaire et visible (Figure 1-10).

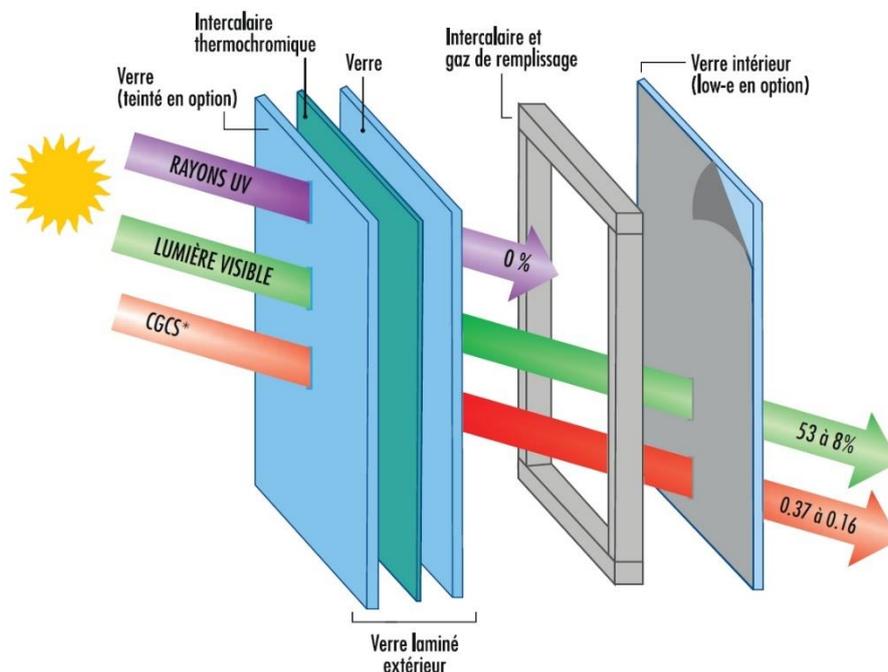


Figure 1-10 : Principe de fonctionnement pour un double vitrage thermochrome (© Prelco inc.)

1.3.2 Caractéristiques techniques du vitrage thermochrome

Plusieurs caractéristiques définissent le vitrage thermochrome comme la transmittance solaire ou visible, la température de transition, la bande et le gradient d'hystérésis.

La transmittance, τ , du vitrage thermochrome est la quantité d'énergie (rayonnement thermique ou lumineux) qu'il est capable de transmettre par rapport au flux incident. La transmittance est dépendante de la longueur d'onde, de l'angle d'incidence et, en plus pour le vitrage thermochrome, de sa température. Avec la transmittance, on définit au moins la réflectance, ρ , ou l'absorptance,

α , dans le cas d'un matériau semi-transparent. En effet par le principe de conservation de l'énergie, si on a au moins deux paramètres on peut retrouver le troisième.

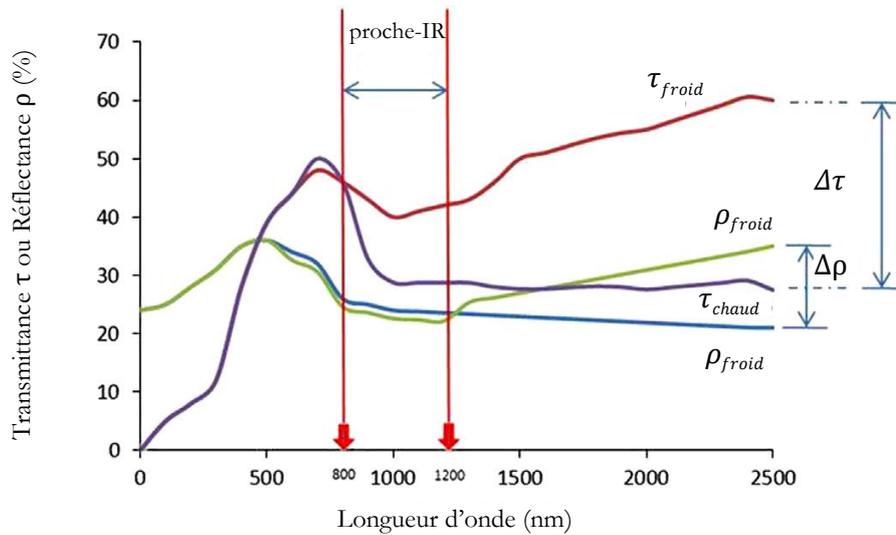


Figure 1-11 : Exemple de la transmittance et de la réflectance d'un vitrage thermochrome selon la longueur d'onde (pour son état le plus froid et le plus chaud) – (reproduit de Kamalisarvestani et al., 2013)

Sur la Figure 1-11, on observe l'évolution de la transmittance ou réflectance selon la longueur d'onde sur tout le spectre solaire, pour son état le plus froid ou le plus chaud. Il est possible à partir des données spectrales, d'intégrer et de calculer une transmittance totale sur tout le spectre solaire, τ_s , (280 – 2500 nm) ou lumineuse, τ_{vis} , sur le spectre visible (380 – 780 nm).

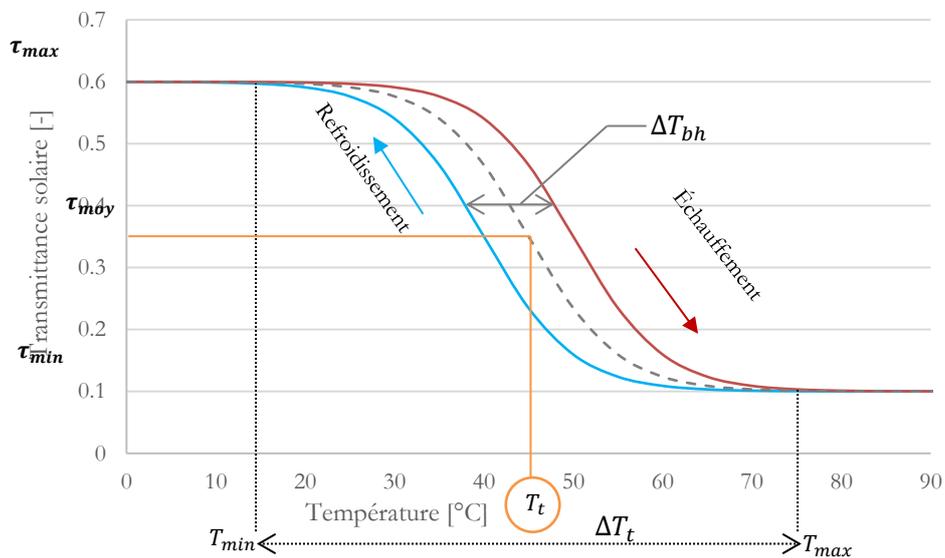


Figure 1-12 : Exemple de la transmittance solaire d'un vitrage thermochrome en fonction de sa température et cycle d'hystérésis

La variation de la transmittance en fonction de sa température est le plus souvent représentée, comme sur la Figure 1-12, sous la forme d'une courbe de type « sigmoïde ». Généralement, ce sont des données issues de mesures dans la littérature en chimie des matériaux. Le phénomène d'hystérésis est toujours observé et reporté plusieurs fois dans les recherches scientifiques (Dou et

al., 2018; Schläefer et al., 2019; Warwick et al., 2015). Il y a donc pour le VTC un cycle d'hystérésis avec un chemin d'échauffement (augmentation de sa température) et un chemin de refroidissement (diminution de sa température). On peut définir l'hystérésis par la propriété d'un système dont l'évolution ne suit pas le même chemin selon qu'une cause extérieure augmente ou diminue. Dans le cas du VTC, les valeurs de transmittance diffèrent entre le cycle d'échauffement ou de refroidissement (voir Figure 1-12).

On définit la température de transition, T_t , par la température à laquelle la transmittance se trouve à son état intermédiaire, τ_{moy} . La transmittance moyenne est égale à $\frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2}$. La bande d'hystérésis, ΔT_{bh} , est la différence de température entre les courbes du cycle d'hystérésis, l'échauffement et le refroidissement. Il est possible de définir, la modulation de la transmittance solaire, $\Delta \tau_s$, par la différence entre l'état le plus teinté τ_{max} et le plus clair τ_{min} . On nommera le delta de température ΔT_t , la différence de température entre T_{max} et T_{min} du vitrage thermochrome. Le gradient d'hystérésis, ∇_h , est le quotient entre la modulation de la transmittance en % et le delta de température. Il est donc égal à $\frac{\Delta \tau_s(\%)}{\Delta T_t(^{\circ}C)}$.

Par exemple, sur la Figure 1-12, pour une transmittance moyenne de 0.35, une variation de la transmittance solaire $\Delta \tau_s$ de 0.5 et des valeurs associées de T_t de 45°C, ΔT_{bh} de 10°C et ΔT_t de 60°C, ∇_h vaut 0.833 °C⁻¹.

Pour un usage dans le bâtiment pour l'augmentation de la performance énergétique, on recherche un ΔT et un $\Delta \tau$ les plus grands possibles, pour garantir une bonne modulation de la réponse des sollicitations extérieures et ainsi profiter du potentiel naturel de l'environnement. Comme par exemple, de se protéger de la chaleur du soleil au moment de fort rayonnement, et de profiter au maximum de l'éclairement naturel quand le temps est couvert.

1.3.3 Fabricants

Les entreprises fabricantes de vitrage thermochrome ne sont pas nombreuses. Cela peut s'expliquer par la compétition avec les autres types de vitrages intelligents et son développement tardif. On retrouve aujourd'hui les fabricants suivants :

Tableau 1-2 : Fabricants de vitrage thermochrome

Fabricant (Pays)	Produit	Plage de température (°C)	τ_{sol}	τ_{vis}	U ($W/m^2.K$)	Prix	Plus d'informations	Référence
Pleotint, LLC (USA)	Suntuitive Optiwhite®	7 - 85	0.342 – 0.085	0.607 – 0.035			Simple vitrage avec revêtement faiblement émissif côté intérieur	http://www.suntuitive.com/ (Site visité en 2020) ou Dans la base de données de WINDOW 7.6
	Suntuitive Starphire® + Solarban® 60 (Low-e ⁴)	10 – 65	0.26 - 0.07	0.56 - 0.08	0.24	-	Double vitrage avec 12 mm de remplissage 90% Argon – 10% Air	
	Suntuitive Clear + Solarban® 60 (Low-e)		0.24 - 0.06	0.54 - 0.08				
	Suntuitive Azuria® + Solarban® 60 (Low-e)		0.15 - 0.03	0.41 - 0.06				
	Suntuitive Solargray® + Solarban® 60 (Low-e)		0.13 - 0.03	0.27 - 0.04				

⁴ Low-e : revêtement spectralement sélectif à faible émissivité

Fabricant (Pays)	Produit	Plage de température (°C)	τ_{sol}	τ_{vis}	U ($W/m^2 \cdot K$)	Prix	Plus d'informations	Référence
Gesimat, GmbH (Allemagne)	Gesimat TC grey + float (Low-e)	0 – 62	0.436 - 0.135	0.66 - 0.151	1.1	Simple vitrage : 340 €/m ² Double vitrage : 395€/m ²	Double vitrage avec 16 mm de remplissage 100 %Argon - Entreprise fermée depuis 2017	http://www.gesimat.de/ (Site visité en 2016) (Entreprise fermée depuis 2017)
	Gesimat TC blue + float (Low-e)		0.462 – 0.214	0.713 – 0.276				
RavenWindow (USA)	Double vitrage clair	-	0.499 – 0.357	0.368 – 0.055	0.488	~195 -210 €/m ²		http://www.ravenwindow.com/ (Site visité en 2019)
	Double vitrage + Cardinal 180 LoE-180 (Low-e)		0.416 – 0.285	0.342 – 0.051	0.352			
	Double vitrage clair + Solarban®70XL (Low-e)		0.121 – 0.030	0.292 – 0.043	0.288			
Fledmex (Allemagne)	Fledmex Thermochrom	-	-	-	-	~1000 €/m ²	-	https://fledmex.com/de/portfolio/fledmex-thermochrom/ (Site visité en 2019)
SageGlass - Saint-Gobain (USA/France)	-	-	-	-	-	-	-	En développement - dépôt de brevet (google patents)
Corning Ltd	-	-	-	-	-	-	-	En développement - dépôt de brevet (google patents)

Le leader de ce marché est Pleotint LLC., avec son vitrage Suntuive. L'entreprise possède plusieurs brevets sur la fabrication de leur vitrage thermochrome et a plus de 33 partenaires fabricants/distributeurs dans 36 pays (dont 10 dans la zone tropicale).

1.3.4 Etude en chimie des matériaux (échelle microscopique)

L'oxyde de Vanadium (VO_2) est l'unique matériau pour le VTC car il exhibe des propriétés thermochromes (Granqvist, 2016). Aucune autre alternative ne semble être connue à ce jour comme matériau thermochromique, en particulier pour la production de revêtement à grande échelle. La température de transition du VO_2 est d'environ 68 °. Cette température est loin d'être idéale pour une application aux bâtiments. Par conséquent, le VO_2 a été sujet à de nombreuses recherches et publications en chimie des matériaux afin d'améliorer la compatibilité du VTC avec ces applications en bâtiments (Granqvist et al., 2009; Kamalisarvestani et al., 2013; Li et al., 2012; Cuce and Riffat, 2015; Chang et al., 2018).

Dans Li et al. (2012), il est défini trois objectifs pour l'implémentation du VO_2 aux vitrages :

1. Diminuer la température de transition à des températures proches de celle du bâtiment
2. Augmenter la transmittance visible
3. Augmenter la modulation de la transmittance solaire (différence entre le maximum et le minimum)

Ces trois objectifs ont été atteints par les chercheurs du domaine. Le premier est le plus simple car il suffit de remplacer quelques pourcentages d'atomes de Vanadium (V) par des atomes de tungstène (W) pour abaisser la température de transition (Li et al., 2012).

Le second est lié à son absorption optique dans les longueurs d'ondes du visible. Cette absorption prend place parce que le VO_2 a une petite bande optique. Une amélioration significative peut être obtenue en utilisant des additifs pour élargir cette bande, comme le Magnésium (Mg) (Dietrich et al., 2015) ou le Zinc (Zn) (Jiang et al., 2014). L'incorporation de fluorine est une autre option. L'augmentation de la transmittance des revêtements au VO_2 dopé Mg est en effet due à l'élargissement de la bande optique, comme il a été démontré expérimentalement dans Li et al. (2013) et numériquement dans Hu et al. (2012). L'amplitude de la température de transition chute quand la concentration en Mg augmente, mais ce n'est pas aussi rapide que pour le dopage au W. La transmittance visible pour un revêtement de 50 nm a augmenté de 39% à 51% quand le dopage au Mg est passé de 0 à 7.2% (Mlyuka et al., 2009).

Il faut ajouter que les revêtements pour les vitrages doivent être durables : ils doivent fonctionner pendant plusieurs années sans pertes significatives des propriétés désirées. Néanmoins, des découvertes récentes ont montré que des surcouches d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) ou de nitrure d'aluminium (AlN) peuvent protéger le revêtement de VO_2 et maintenir ses propriétés thermochromiques pour de longues durées à température et humidité élevées (Kamalisarvestani et al., 2013).

Le troisième objectif a été le plus compliqué à atteindre. En effet, il n'a été que récemment découvert qu'une couche composée de nanoparticules de VO₂, au lieu d'un revêtement de VO₂ continu, peut améliorer la modulation de la transmittance solaire (Li et al., 2010). On appelle ce phénomène le nano-thermochromisme.

Pour résumer, au niveau microscopique le vitrage thermochrome dans sa forme stable et pure n'est pas des plus performantes. C'est pour cela que les chimistes ont trouvé des moyens de le doper pour améliorer son fonctionnement et ses propriétés. On est donc capable de répondre aux objectifs d'utilisation du vitrage thermochrome tout en le rendant stable et durable dans le temps. Il est aussi possible de tuner et d'optimiser les propriétés du vitrage thermochrome selon le souhait du concepteur pour une application adaptée aux climats et aux bâtiments avec des objectifs d'efficacité énergétique.

1.3.5 Etude en physique du bâtiment (échelle macroscopique)

De nombreuses études dans le domaine énergétique et de la physique du bâtiment ont été réalisées au cours des dix dernières années sur les vitrages thermochromes.

Les chercheurs se sont intéressés à l'impact du VTC sur la consommation d'énergie (chauffage, climatisation et éclairage), ainsi que sur le confort thermique et visuel. Les études ont majoritairement été réalisées à l'aide du logiciel EnergyPlus (DOE, 2010) pour effectuer les simulations thermiques et photométriques (Aburas et al., 2019).

Le but de ces études était tout d'abord de caractériser les propriétés du VTC, puis d'étudier son comportement et son impact via la simulation dynamique. Une partie des recherches s'est aussi axée sur l'amélioration des modèles proposés par les outils disponibles. De plus, de nombreuses recherches étudient l'effet de la température de transition, la bande et le gradient d'hystérésis sur la consommation ou le confort. L'objectif final de ces recherches est de faire progresser la connaissance du VTC en physique du bâtiment et soutenir l'amélioration de son développement particulièrement en ce qui concerne les propriétés du matériau thermochrome.

On trouve dans le Tableau 1-3, les modèles de VTC dans les codes de simulations existants.

Tableau 1-3 : Synthèse des modèles VTC dans les codes de calculs ou logiciels existants

Code de Calcul/Logiciel	Méthode de résolution du modèle conductif	Modèle éclairage naturel	Modèle aérodynamique	Modèle vitrage TC ?	1D/2D/3D ?	Con-naissances expertes ?	Fonction de contrôle	Méthode couplée ou décalée ?	Mode d'utilisation	Réfs
EnergyPlus	CTF ⁵ , DiffFin ⁶	Split-Flux	Oui	Oui	1D	++	Fonction en « escalier » (seuils à définir)	Décalée	Gratuit et Open source	(DOE, 2010); (Hoffmann et al., 2014)
IDA ICE	DiffFin	Ray tracing (Radiance)	Oui	Oui	1D	+++	A définir par l'utilisateur	Décalée	Payant	(Loonen et al., 2017)
CODYRUN	DiffFin	Split-Flux	Oui	Oui	1D	++	Fonction en « escalier » et rampe (seuils à définir)	Décalée	Gratuit et Open source	(Boyer et al., 1998); travaux en cours ⁷
ESP-r	VolFin ⁸	Non	Oui	Oui	1D	+	Fonction rampe (seuils à définir)	Décalée	Gratuit et Open source	(Kokogiannakis et al., 2014 ; Loonen et al., 2017)
TRNSYS	CTF	Non	Oui	Oui (type 56)	1D	+++	A définir par l'utilisateur	Décalée	Payant	(Loonen et al., 2017 ; Xu et al., 2012)
BuildingEnergy	DiffFin	Non	Non	Oui	1D	+++	A définir par l'utilisateur	Décalée	Non accessible	(Ye et al., 2013a)
IES VE	DiffFin	Ray tracing (Radiance)	Oui	Non	1D	--	--	--	Payant	Loonen et al, 2017

⁵ Fonction de transfert

⁶ Différences Finies

⁷ Dans le cadre des travaux menés pendant et à la suite de cette thèse

⁸ Volumes finis

Dans la grande majorité de la littérature depuis 2010, les chercheurs effectuent les simulations pour une ou plusieurs villes à climats différents. Dans le Tableau 1-4, les villes étudiées dans la littérature sont classifiées selon Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006) en quatre grandes catégories de climats : tropical, sec, tempéré et continental. La recherche menée sur l'interaction du VTC en physique du bâtiment peut être classée selon l'outil ou le logiciel utilisé pour produire les résultats de simulations et donc selon le choix du modèle.

Tableau 1-4 : Classification de Köppen-Geiger pour les climats répertoriés dans littérature

Classification de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006)			
A - Tropical	B - Sec	C -Tempéré	D - Continental
Chennai	Abu Dhabi	Catane	Beijing
Saint-Denis	Caire	Dali	Chicago
Townsville		Guangzhou	Harbin
Weipa		Haikou	Hailar
		Houston	Helsinki
		Kunming	Moscou
		Londres	Östersund
		Milan	Shenyang
		Palerme	
		Paris	
		Rome	
		Turin	
		Xi'an	

1.3.5.1 Etudes avec EnergyPlus

Le modèle du VTC mis en place dans EnergyPlus (DOE, 2010) à partir de 2010, est un modèle 1D en différences finies en thermique et un modèle split flux en photométrie (ce modèle sera décrit en détail dans le *Chapitre 3*)

La variation des propriétés du VTC est discrétisée en palier en fonction de la température (méthode en escalier, Figure 1-13) à définir par l'utilisateur. A chaque pas de temps, la température du VTC du pas de temps précédent est utilisée pour définir la transmittance solaire et visible, puis on passe

à la résolution du problème thermique et photométrique, pour finalement trouver la température du VTC du pas de temps suivant : c'est la méthode dite « décalée ». La méthode en escalier reste simple d'implémentation mais évalue mal les valeurs des propriétés thermo-optiques du VTC car elle fait rester la transmittance, par exemple, sur une valeur constante sur une grande plage de température. De plus cette courbe représente moins bien la réalité.

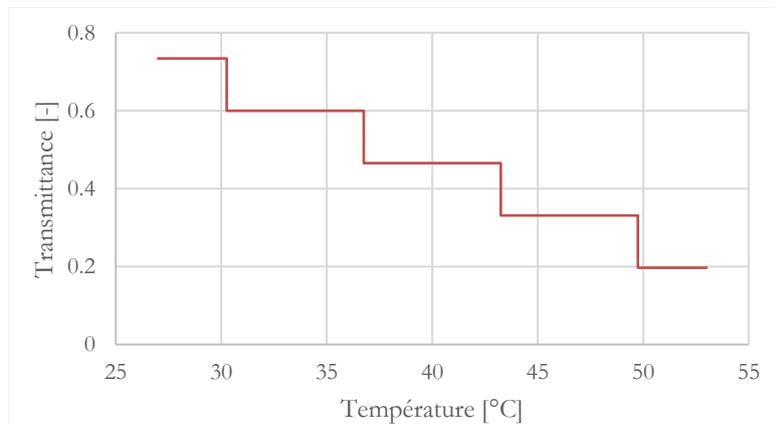


Figure 1-13 : Exemple de transmittance à 5 paliers, à définir dans EnergyPlus (méthode en escalier)

En 2010, Saeli et al. (2010) ont simulé plusieurs VTC différents avec EnergyPlus pour 8 localisations différentes. Ils ont utilisé les fichiers météorologiques des villes suivantes : Caire, Palerme, Rome, Milan, Paris, London, Helsinki et Moscou. Les résultats montrent que 30 à 40% d'économie d'énergie (EdE) est possible en comparaison avec un vitrage simple et clair et que le maximum est atteint pour le climat le plus chaud (Palerme).

Une étude empirique d'un VTC installé dans une cellule test assimilable à un bureau à échelle réelle a été menée par Lee et al. (2013). Les résultats expérimentaux ont permis la caractérisation de la variation en fonction du rayonnement incident et de la température extérieure. Cela a permis de montrer comment le rayonnement solaire influence la température du vitrage. L'étude propose aussi une simulation avec EnergyPlus pour deux climats aux USA : Houston et Chicago. Les résultats ont montré qu'il y a 4 à 43% d'EdE comparé au vitrage standard prescrit dans (ASHRAE, 2004).

Dans Warwick et al. (2013), les auteurs ont examiné l'effet de la température de transition et de la bande d'hystérésis d'un VTC appliqué à un bureau pour différents climats : Palerme, Londres et Helsinki. Les résultats mettent en avant que pour le climat chaud, avec une faible température de transition (20 °C) et bande d'hystérésis (0 °C), la consommation d'énergie peut être réduite de 54% en comparaison à un double vitrage standard.

Dans Hoffmann et al. (2014), une étude de simulation avec EnergyPlus a pris en compte la climatisation, le chauffage et l'éclairage artificiel. L'étude a été réalisée pour les mêmes climats que dans Lee et al. (2013). Les auteurs ont donc proposé d'étudier un VTC hypothétique avec différentes températures de transition afin de déterminer des caractéristiques optimisées. Ils ont mis en avant que selon leurs résultats, il pourrait y avoir une économie significative sur les consommations et sur l'éclairage, pour une température de transition entre 14 et 20 °C et plus particulièrement pour les grandes surfaces vitrées dans le climat le plus chaud (ici, Houston). Ils

montrent que le VTC a de meilleures performances qu'un vitrage hautement isolé avec stores intérieurs, sur les façades Sud et Ouest.

En 2014, Warwick et al. (2014) ont étudié la relation entre la température de transition et le gradient d'hystérésis. Les auteurs ont trouvé qu'avec la transition de température la plus basse et le gradient de température le plus faible, il est possible de réduire de 51% la demande en énergie en comparaison à un vitrage clair standard.

Dans son article, Liang et al. (2015) ont utilisé EnergyPlus pour simuler un VTC dans différents climats : Londres, Guangzhou et Beijing, en prenant en compte les consommations de la climatisation, du chauffage et de l'éclairage artificiel ainsi que le confort visuel. Les résultats de l'article montrent qu'il y a une diminution du besoin en froid mais une augmentation du besoin de chauffage. Comparé à un double vitrage clair, il y a entre 10 et 15% d'EdE et une diminution de l'occurrence d'éblouissement.

En 2015, une étude paramétrique locale a été effectuée par Warwick et al. (2015) sur l'effet de la variation de la bande et du gradient d'hystérésis du VTC pour 4 températures de transition et 3 climats différents : Palerme, London, Helsinki. Les simulations d'un VTC théorique ont été faites avec EnergyPlus pour savoir qui des 2 paramètres, la bande ou le gradient, a le plus d'influence sur les EdE de la climatisation, du chauffage et de l'éclairage. La zone simulée représentant un bureau d'un bâtiment moderne, aux dimensions standard 5 m x 6 m x 3 m, avec un ratio de surface vitrée de 95% orienté Sud et tous les autres murs considérés comme adiabatiques. Les auteurs ont voulu, ici, prendre en compte seule l'influence de la paroi vitrée avec le VTC. Les résultats montrent que dans des conditions idéales, le maximum d'EdE est supérieur à 50%, comparé à un double vitrage standard, pour le climat le plus chaud où la transition du VTC se fait à basse température (proche des températures de la pièce) avec une hystérésis à bande réduite et à forte pente (gradient élevé). L'article souligne l'importance de la température de transition sur l'influence des résultats et sur la capacité au VTC à avoir une meilleure efficacité énergétique.

Dans Costanzo et al. (2016), les auteurs ont proposé une étude paramétrique locale sur la température de transition d'un VTC théorique avec 3 états de variation. Les simulations dynamiques se font avec EnergyPlus et l'hystérésis n'est pas pris en compte. L'étude considère 3 climats différents : Catane, Milan et Paris, en prenant en compte la consommation totale d'énergie, le confort thermique et le confort visuel. Les résultats montrent que 20% d'EdE, au maximum, est possible en comparaison à un double vitrage isolé pour le climat le plus chaud. On peut aussi ajouter qu'il y a 10% d'heures d'inconfort thermique en moins. Concernant le confort visuel, les auteurs concluent que le VTC contribue à la diminution de l'occurrence d'éblouissement et à l'amélioration de l'homogénéité de la répartition de l'éclairement sur le plan utile.

En 2017 dans le cadre d'une participation à l'*Australasian Building Simulation Conference* à Melbourne en Australie, nous avons réalisé une étude sur la sensibilité des paramètres d'entrées du vitrage thermochrome (Ah-Nieme et al., 2017). Ces travaux nous ont permis de mieux comprendre le comportement du VTC soumis au rayonnement solaire et guider nos choix et objectifs d'amélioration de la modélisation. Cette étude consiste donc par des simulations thermiques et photométriques dynamiques avec EnergyPlus pour 4 climats tropicaux : Saint-Denis, Chennai, Weipa et Townsville, sur une cellule type bureau. La méthode du delta de Borgonovo (Borgonovo, 2007) et celle du Latin Hypercube pour les échantillons avec 11 paramètres ont été utilisées. Au total 4096 simulations ont été réalisées. L'article décrit l'observation de 3 sorties de modèles :

- Indice de consommation d'énergie (climatisation et éclairage),
- Indice de confort thermique ($T_{op} > 26 \text{ °C}$),
- Indice de confort visuel (UDI 300 – 2000 lux) (David et al., 2011)

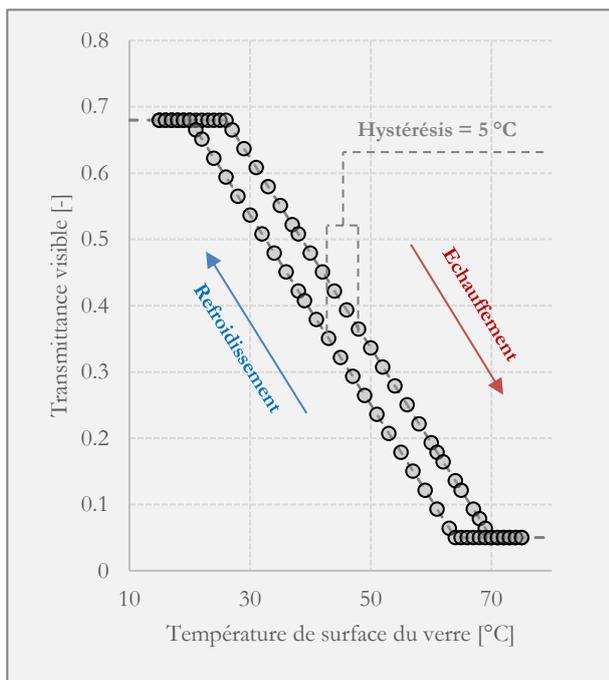
Les résultats ont montré que les paramètres d'entrées les plus influents sont : le taux de surface vitrée, l'orientation du bâtiment et la transmittance maximum, τ_{max} , dans le solaire pour l'indice d'énergie et de confort thermique. Pour l'indice de confort visuel, c'est la transmittance visible maximum, τ_{vis} , qui arrive à la troisième position. Il est important de noter que la température de transition arrive juste après et fait partie des paramètres qui influent sur la consommation d'énergie et le confort thermique et visuel. Ces paramètres d'entrées doivent être choisis avec attention quand on veut correctement concevoir un bâtiment. On peut ajouter que ces paramètres influents sont aussi des paramètres importants de la modélisation.

En 2019, une étude de la performance d'un VTC et l'influence de l'hystérésis sur le besoin en énergie et le confort visuel a été réalisée par Giovannini et al. (2019). Les auteurs ont tout d'abord caractérisé les propriétés optiques du VTC avec spectrophotomètre à sphère intégrante, ce qui a permis la mesure de la transmittance et de la réflectance sur les longueurs d'ondes du spectre solaire, ainsi que la mesure du cycle d'échauffement et du cycle de refroidissement du VTC. Les simulations ont été effectuées avec Ladybug/Honeybee (Roudsari et al., 2013) dans l'environnement Rhino3D/Grasshopper (Bachman, 2017). Les modèles utilisés dans ces outils viennent d'EnergyPlus avec l'Energy Management System (EMS) et de Radiance/Daysim. L'EMS d'EnergyPlus est un langage au sein du code de calcul qui permet d'utiliser les sorties de ce dernier pour contrôler les entrées selon des règles simples et logiques (de type « if » « else ») à chaque pas de temps. Pour approfondir en détail le processus de simulation, il est conseillé de se référer à l'article de Favoino et al. (2016).

Les auteurs ont proposé donc un nouveau processus de simulation en combinant 2 outils sur 2 domaines physiques différents. Selon l'article, aucun autre outil de simulation ne peut simuler correctement l'impact du VTC sur la thermique et sur l'éclairage naturel dans un même environnement. Le processus fait une simulation photométrique de chaque état du VTC avec Daysim (9 simulations distinctes) puis une simulation thermique avec EnergyPlus en prenant en compte la réduction du temps d'utilisation de l'éclairage artificiel des résultats de Daysim. La variation de la transmittance en fonction de la température est effectuée avec l'EMS pour le modèle numérique du VTC. C'est un modèle de variation discontinue en escalier, avec la discrétisation en 9 états issus de la mesure. Les auteurs ont voulu ici prendre en compte l'hystérésis grâce aux données des mesures en posant certaines hypothèses (voir Figure 1-14) :

- Le chemin emprunté par la transmittance pour l'échauffement est différent de celui pour le refroidissement, il y a une bande d'hystérésis (par exemple de 5 °C) entre les deux cycles ;
- Si la température au pas de temps présent est supérieure à celle du pas de temps précédent, on se trouve dans un cycle d'échauffement et inversement ;
- Si un cycle est interrompu, la transmittance reste constante jusqu'à rejoindre un des 2 cycles, en traversant la bande d'hystérésis.

a) Cycle complet



b) Cycle interrompu

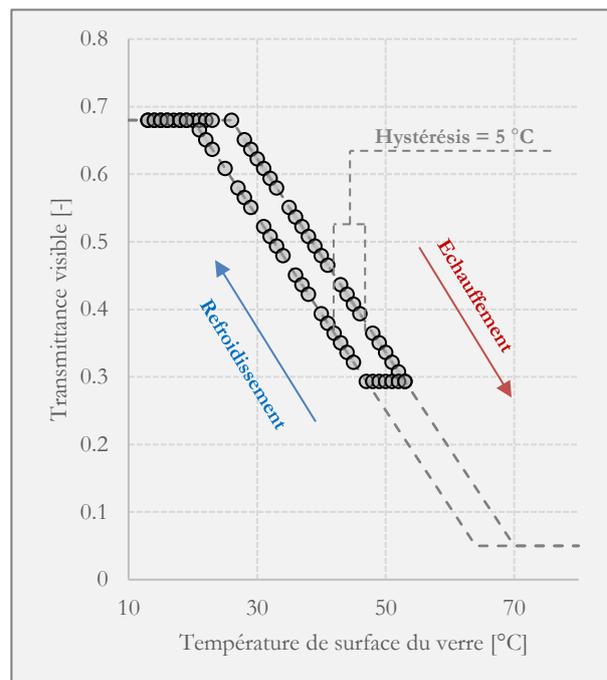


Figure 1-14 : Cycle d'hystérésis de la transmittance visible en fonction de la température de surface du VTC pour : (a) un cycle complet ; (b) un cycle interrompu (reproduit de Giovannini et al., 2019)

Même si la Figure 1-14 est représentée de manière linéaire, le modèle implanté dans EnergyPlus est bien celui de la méthode en escalier (discontinu en 9 états).

Les simulations ont été effectuées pour 3 villes (Abu Dhabi, Turin, Östersund) en prenant en compte la consommation totale (climatisation, chauffage, et éclairage artificiel) et le calcul de l'UDI 100-3000.

Les résultats montrent que par rapport à un vitrage statique avec une sélectivité comparable, il y a 3 à 10 % d'EdE. De plus, on peut observer 5 à 20% de l'amélioration de la disponibilité en lumière naturelle sur un plan utile. L'augmentation de l'hystérésis a montré un effet positif sur la disponibilité de la lumière naturelle (5 à 15%) et la réduction de l'éblouissement dû au rayonnement direct (12% à 25%) avec un effet négligeable sur la consommation totale. Les auteurs ont conclu que les améliorations apportées au modèle permettent aux résultats d'être plus fiables et de montrer l'efficacité réelle du VTC par rapport aux autres vitrages statiques.

1.3.5.2 Etudes avec TRNSYS

En 2012, Xu et al. (2012) ont simulé un VTC avec TRNSYS 16. Ils ont utilisé 5 villes chinoises : Dali, Haikou, Shanghai, Shenyang et Xi'an. La configuration utilisée dans l'article est un double vitrage VTC (couche extérieure). Leurs résultats montrent 85% d'EdE en comparaison à un vitrage simple et clair. On peut ajouter qu'il y a une réduction de la consommation globale, mais une augmentation du chauffage. Les auteurs concluent donc que le VTC est plus adapté pour les climats chauds.

Dans Yang et al. (2015), les auteurs proposent un nouveau modèle thermique pour le changement graduel des propriétés optiques d'un VTC dans le modèle énergétique de bâtiment TRNSYS 16. Le modèle du VTC est basé sur le modèle d'Alvarez (Alvarez et al., 1998), qui est un modèle thermique avec film (épaisseur négligeable) en **régime permanent**. Les auteurs font le choix d'approximer l'hystérésis de la fonction de variation de la transmittance par une courbe moyenne entre les deux cycles (échauffement et refroidissement). Le modèle est ensuite validé expérimentalement, sur l'évaluation de la consommation en froid d'une cellule test. Finalement, les auteurs font une simulation de modèle pour 3 VTC différents et proposent un VTC « idéal » pour 5 villes chinoises : Guangzhou, Kunming, Harbin, Beijing et Hailar. Les résultats montrent que pour le VTC idéal, la consommation en climatisation peut être réduite de 81.7% et de 70.5%, en comparaison à un vitrage clair et un vitrage faiblement émissif, respectivement. Néanmoins, pour la consommation de chauffage, le VTC a une performance inférieure au vitrage peu émissif.

1.3.5.3 Etudes avec BuildingEnergy

En 2012, Ye et al. (2012) publient des résultats de simulation d'un VTC avec BuildingEnergy (Ye et al., 2013a, 2013b): modèle validé expérimentalement par la méthode ANSI/ASHRAE Standard 140-2004. Ils ont effectué des simulations pour 5 villes chinoises avec des climats différents : Harbin, Beijing, Shanghai, Guangzhou, Kunming. Les auteurs proposent d'évaluer la performance d'EdE de plusieurs vitrages sur une base commune d'un indice de consommation. Ils montrent que le VTC n'est pas plus bénéfique pour les EdE qu'un vitrage à contrôle classique. Le contrôle de l'émissivité est selon l'article plus avantageux. La mauvaise performance du VTC dans cet article est à relativiser à la vue des propriétés de ce dernier car il n'est pas adapté pour une application bâtiment et au climat froid de ces villes. Même s'il y a très peu d'informations sur la modélisation du VTC, une volonté claire d'avoir un modèle fiable est affichée par les auteurs.

Dans Long et al. (2015), une étude expérimentale et une étude numérique ont été réalisées sur un double VTC et un simple VTC en comparaison à un double vitrage ordinaire pour la première fois. Les résultats expérimentaux montrent que la cellule test consomme approximativement 11.1% de climatisation en moins qu'avec un double vitrage ordinaire. Les simulations ont été effectuées avec le code BuildingEnergy. Les résultats de simulations montrent que pour les climats chauds, en comparaison au double vitrage ordinaire :

- Le simple VTC utilise 8.7% de consommation de climatisation en moins ;
- Le double VTC utilise 11.6% de consommation de climatisation en moins.

1.3.5.4 Etude avec ESP-r

Dans Kokogiannakis et al. (2014), les auteurs étudient la quantité d'énergie nécessaire pour le chauffage et la climatisation en utilisant un VTC par la simulation avec ESP-r, sur un bâtiment de type bureau fortement vitré. Les simulations sont réalisées pour 3 villes : Abu Dhabi, Shanghai, Berlin.

Les résultats montrent que le VTC peut réduire significativement la consommation de froid d'approximativement 30% pour les climats chauds en comparaison au système de double vitrage

avec miroir et au triple vitrage clair. Néanmoins, les résultats mettent en évidence que le VTC a un impact négatif pour les climats froids.

1.4 CONCLUSIONS ET POSITIONNEMENT DE LA THESE

Nous avons vu lors de ce chapitre l'importance du vitrage dans la performance énergétique de l'enveloppe. Pour concevoir un bâtiment bioclimatique durable il faut avoir des vitrages performants énergétiquement et adaptés au climat. Nous avons aussi mis en évidence qu'une catégorie particulière du vitrage peut s'avérer très utile et change également de paradigme dans la façon de concevoir les nouveaux bâtiments. Parmi ces vitrages intelligents, il y a un type en particulier qui semble être plus adapté aux climats chauds, c'est le vitrage thermochrome.

Dans la littérature scientifique, il a été démontré que ce vitrage est capable à la fois de réduire la consommation de climatisation tout en améliorant le confort thermique et visuel. Les propriétés particulières de ce vitrage pourront être mises à profit de la conception en milieu tropical chaud et humide, comme à La Réunion. De plus, nous sommes les seuls à effectuer ces travaux pour la zone tropicale, 'A' selon la classification de Köppen-Geiger (Aburas et al., 2019).

L'état de l'art du VTC, nous montre que le matériau est mature et est déjà commercialisé sur des projets de construction. Son comportement physique à échelle réelle a été étudié pour soutenir le développement du matériau. Les études se sont portées sur l'influence de la température de transition, l'influence du gradient et de la bande d'hystérésis, et de sa capacité à réduire les consommations ainsi qu'à améliorer le confort des occupants.

Néanmoins, les modèles utilisés pour les études de simulations énergétique du VTC ont des lacunes et sont améliorables. Il manque aussi des connaissances sur le comportement du VTC en général, surtout quand il est soumis au rayonnement solaire en milieu tropical. Il faut pouvoir étudier d'un côté le matériau et son fonctionnement à l'échelle microscopique ainsi que son impact et ses interactions sur le bâtiment à l'échelle macroscopique. Tout cela aura un impact sur le développement du matériau et sur la conception des bâtiments intégrant les VTC. Il est donc nécessaire d'avoir des modèles fiables sur lesquels les fabricants peuvent s'appuyer pour fabriquer le VTC le plus adapté et optimisé pour un climat, une orientation et un type de bâtiment donnés.

L'un des enjeux est de pouvoir se placer en avance sur le développement de ce matériau pour guider son processus de fabrication par l'amélioration de son modèle. Pour tenter d'améliorer le modèle du VTC, il faut tout d'abord identifier ses limites. Les limites des modèles de vitrage thermochrome dans les outils de calculs existants sont :

- La fonction de contrôle de la transmittance par rapport à la température est dans la majorité des cas une fonction en escalier (constante par morceau) et dans certains cas linéaires ;

- L'absence de modèle qui présente un couplage dynamique en temps réel des effets de la température sur les propriétés thermo-optiques ;
- L'absence de prise en compte de la répartition possiblement hétérogène du champ de température et de transmittance sur la surface du verre (modèle 2D).

Nous allons donc proposer à travers cette thèse un modèle en deux dimensions du comportement du VTC, en considérant les phénomènes thermiques et les sollicitations climatiques de façon dynamique. Dans ce modèle, tout particulièrement, nous allons prendre en compte finement la sollicitation solaire, le rayonnement extérieur et les masques proches. Pour pallier au couplage dynamique, nous allons proposer un modèle « décalé » avec un pas de temps plus petit devant la réaction thermo-optique du VTC. De plus, nous allons modéliser la forme de la fonction de contrôle (transmittance/absorptance en fonction de la température) de type « sigmoïde » comme observée et mesurée en laboratoire. Ensuite, au travers d'une expérimentation, nous allons confronter nos résultats de simulations des modèles à ceux mesurés en conditions réelles, sur plusieurs plages temporelles dans le but d'apporter des éléments de validation.

L'apport original de cette thèse réside dans la modélisation en deux dimensions avec la prise en compte fine de la répartition du champ de température et du champ de transmittance de façon dynamique, ainsi que le couplage de ce modèle original avec des codes de calculs thermique 1D et photométrique de bâtiment. De plus, l'évaluation de l'impact de ce type de vitrage sur la répartition des flux de chaleur et d'éclairement naturel à l'intérieur du bâtiment, constitue aussi un apport innovant dans la thématique. Pour finir, on peut aussi ajouter, que les campagnes de mesure expérimentale menées lors de cette thèse sont uniques à la Réunion et dans la zone intertropicale sur un vitrage thermochrome.

Chapitre 2 EXPERIMENTATION IN SITU DU VITRAGE THERMOCHROME

L'objectif de ce chapitre est de présenter une approche descriptive du dispositif expérimental et de l'observation des phénomènes. Tout d'abord, cette expérimentation permettra l'observation du comportement du *Vitrage ThermoChrome* (VTC) sous l'influence du rayonnement solaire en conditions réelles. Ensuite, nous allons mesurer les valeurs de températures de surfaces du vitrage qui serviront de base de données uniques sous ces latitudes (La Réunion). Enfin, ces données serviront à la validation du modèle proposé au chapitre 4.

2.1 INTRODUCTION A L'EXPERIMENTATION

L'une des problématiques soulevées pour cette étude expérimentale a été celle de la mesure fiable des températures de surface de verre. En effet, cette donnée est importante pour à la fois comprendre le mécanisme thermique du VTC et valider le modèle proposé. Ici, la température du vitrage est cruciale, car nous sommes en présence d'un matériau qui est régi à sa propre température et aura donc une conséquence sur les conditions intérieures.

La cellule expérimentale est la cellule LGI (Miranville, 2002). C'est une expérimentation in situ à échelle 1 et elle se situe sur le site expérimental de l'IUT de Saint-Pierre à l'Université de La Réunion (21.340408 S, 55.490060 E) sur une surface d'environ 260 m². Sur la Figure 2-1, le site expérimental est en vert, la cellule LGI est en rouge et les stations météorologiques sont en violet.



Figure 2-1 : Situation géographique du site expérimental

Les dimensions de la cellule LGI sont similaires à celles d'un bureau ou d'une chambre. Elle fait 3.2 m de long pour 3.2 m de large avec une hauteur sous faux plafond de 2.50 m. Elle comporte donc deux zones du point de vue thermique, la pièce à étudier et les combles. La toiture est inclinée à 20°. La façade principale est orientée Nord/Nord-Est avec un azimut de 9° (Malet-Damour, 2015).

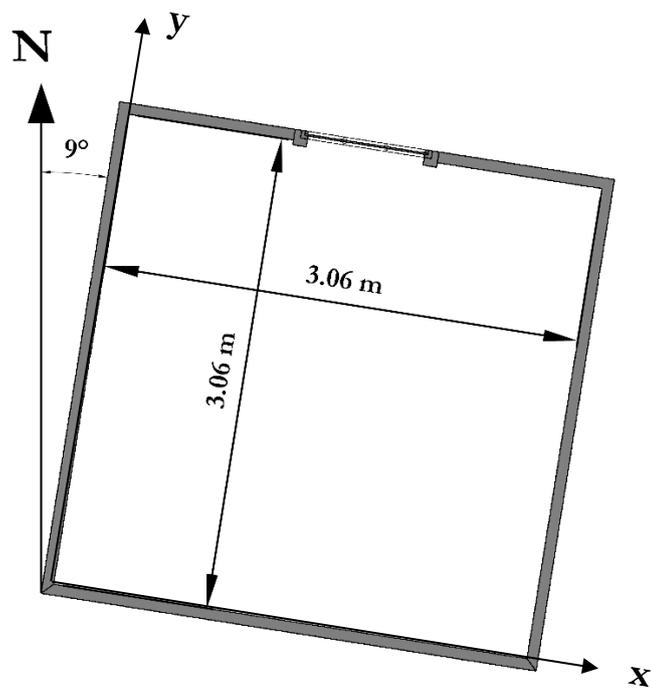


Figure 2-2 : Vue en plan de la LGI

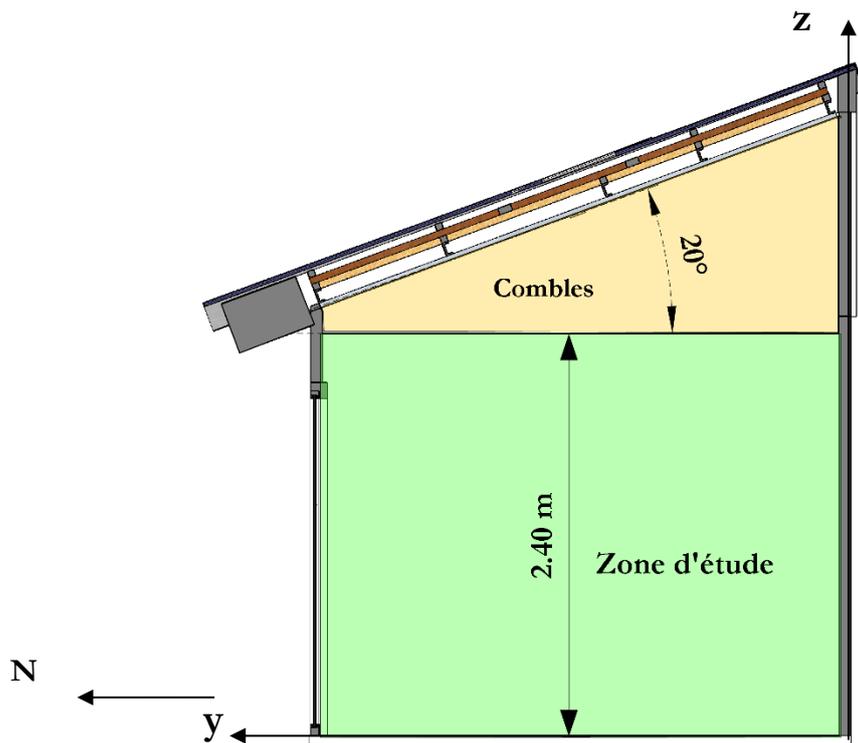


Figure 2-3 : Coupe transversale de la LGI

La cellule LGI a été utilisée pour de nombreuses études expérimentales lors de ces 25 dernières années. Cela a permis la mise en œuvre de plusieurs expérimentations sur des matériaux et des technologies innovantes pour la validation globale de modèles à la fois en thermique du bâtiment (Miranville, 2002; Guichard, 2013) qu'en photométrie et éclairage naturel (Fakra et al., 2011; Malet-Damour, 2015).

Voici la composition et la description des matériaux de la cellule LGI :

- Plancher : Dalettes de béton de 40 mm sur polystyrène de 60 mm ;
- Parois verticales : Panneau sandwich : fibrociment 5 mm + polyuréthane 60mm + fibrociment 5 mm ;
- Toiture : Tôle ondulée acier galvanisé 1 mm + lame d'air 300 mm + MCP⁹ 5.26 mm + placoplâtre 12.5 mm ;
- Faux-plafond : Plaque de bois 13 mm + 30 mm de polystyrène.

2.1.1 Mise en œuvre du VTC

Dans le cadre de l'étude expérimentale de cette thèse, la façade Nord de la LGI a été modifiée. Auparavant, il s'y trouvait une porte vitrée avec un verre clair et simple, et une menuiserie en aluminium. Des travaux ont été entrepris pour agrandir le cadre bâti qui allait accueillir la nouvelle menuiserie et le VTC. Aujourd'hui, nous y avons installé une porte vitrée en menuiserie bois contenant la technologie thermochrome.

Voici les étapes de mise en œuvre du vitrage thermochrome sur la cellule LGI :

1. Recherche de fabricants de vitrage avec le film thermochrome ;
2. Démarcher le fabricant et exposer le but et les besoins de l'expérimentation ;
3. Trouver un intermédiaire pour la livraison à La Réunion ;
4. Sous-traiter avec un artisan la fabrication de la menuiserie qui va accueillir le VTC ;
5. Modifier le cadre bâti de la paroi principale de la LGI pour correspondre aux nouvelles dimensions du VTC ;
6. Montage de la menuiserie et du verre, en y plaçant des thermocouples (sur le verre et dans le châssis)
7. Installation de la porte vitrée dans le cadre bâti ;
8. Finition de l'étanchéité de la paroi et de la peinture (cellule et menuiserie).

⁹ Matériau à changement de phase (Guichard, 2013)

<p>Découpage et agrandissement du cadre bâti existant</p>	<p>Mise en place des thermocouples dans le châssis intérieur de la menuiserie</p>
	
<p>Mise en place du verre thermochrome dans la menuiserie</p>	<p>Pose de la menuiserie dans le cadre bâti avant finition</p>
	

Figure 2-4 : Etapes de la mise en œuvre du VTC dans la LGI (photos prises entre le 29 Mai et le 4 Juin 2018)

Le temps d'acheminement et de mise en œuvre a été long et fastidieux, car il n'y a aucun fabricant du système de vitrage thermochrome localement, ni nationalement. On a fait appel à une entreprise des Etats-Unis d'Amérique pour la fabrication du VTC. Le transport s'est donc fait dans une palette et par bateau (+3 mois de trajet). Cela a pris 2 ans et demi, en tout, pour que le système d'expérimentation soit opérationnel et que les mesures puissent démarrer.



Figure 2-5 : Façade Nord avec de la LGI avant / et illustration après

Sur la Figure 2-5, on peut observer la cellule avant et après la transformation et les travaux.

Le VTC est composé de deux couches de verres intercalées, au milieu desquelles se trouve une résine contenant de l'oxyde de vanadium. Le VTC a été fourni par l'entreprise Pleotint Ltd. de la marque Suntuive¹⁰, située dans le Michigan aux Etats-Unis. La menuiserie du VTC est en bois. Cette menuiserie a été fabriquée sur place et sur mesure par une entreprise locale « Menuiserie les Camélias », située à Saint-leu à La Réunion. Les dimensions de la menuiserie sont décrites sur la Figure 2-6.

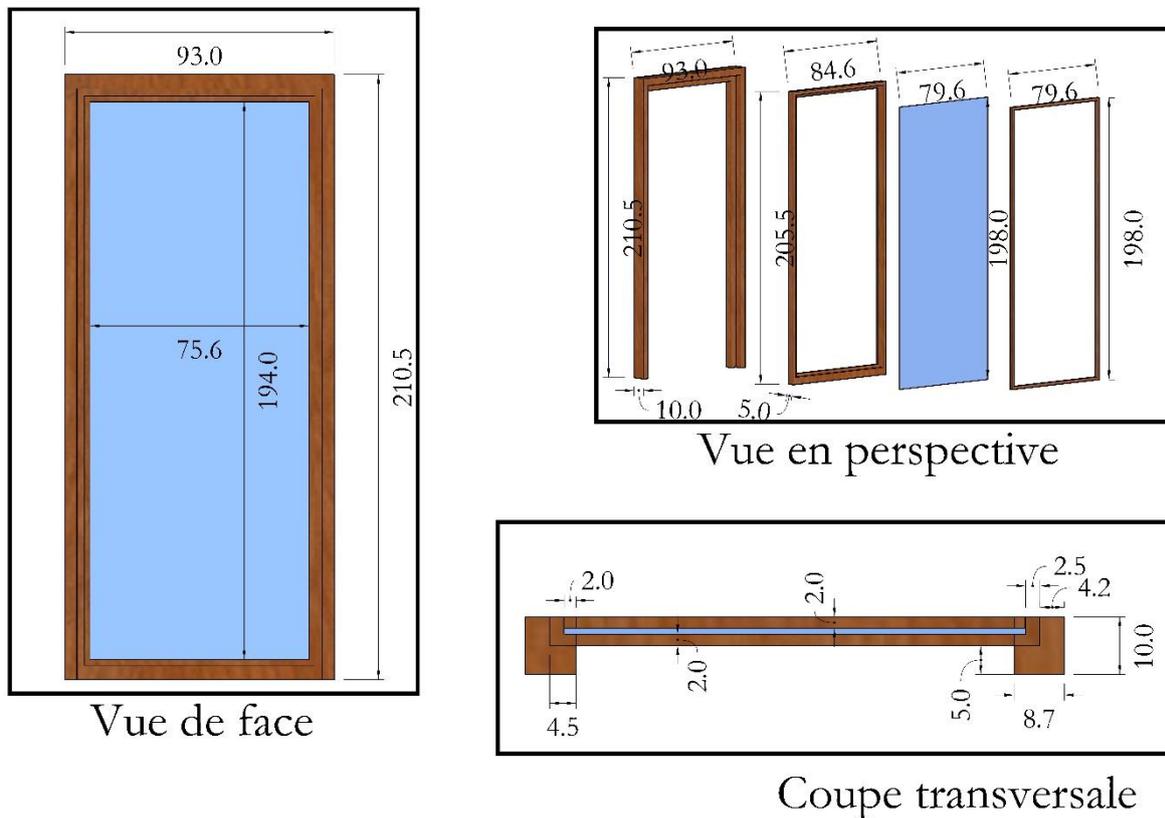


Figure 2-6 : Dimensions de la menuiserie du VTC

Pour éviter un trop grand transfert de chaleur et minimiser l'absorption, la menuiserie a été peinte en blanc (voir Figure 2-5). La surface vitrée visible fait 75.6 cm x 194 cm de hauteur. Le VTC est composé de deux couches de verre clair entre lesquelles s'intercale une couche très mince comprenant la technologie thermochrome. Le VTC a une épaisseur finale de 1.015 cm et possède un revêtement faiblement émissif à l'intérieur. C'est-à-dire que l'émissivité extérieure, ϵ_1 , est supérieure à celle intérieure, ϵ_2 . Les propriétés thermo-optiques du VTC, données par le fabricant sont issues de la base de données de WINDOW 7.6¹¹.

¹⁰ Marque brevetée par Pleotint Ltd. - <https://suntuiveglass.com/>

¹¹ Logiciel de calcul des paramètres de performances des vitrages et fenêtres, développé par Berkeley Lab (USA)

Tableau 2-1 : Propriétés thermiques fixes du VTC

Epaisseur (mm)	ϵ_1	ϵ_2	λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
10.15	0.84	0.158	0.798

Tableau 2-2 : Propriétés thermo-optiques dynamiques en fonction de la température du VTC

Température	τ_{sol}	α_{sol}	τ_{vis}	α_{vis}
0	0.342	0.601	0.607	0.393
7	0.342	0.601	0.607	0.393
15	0.333	0.61	0.585	0.415
25	0.314	0.631	0.537	0.463
35	0.281	0.666	0.454	0.546
45	0.234	0.717	0.335	0.665
55	0.189	0.764	0.232	0.768
65	0.141	0.814	0.128	0.872
75	0.11	0.846	0.067	0.933
85	0.088	0.868	0.035	0.965
95	0.088	0.868	0.035	0.965

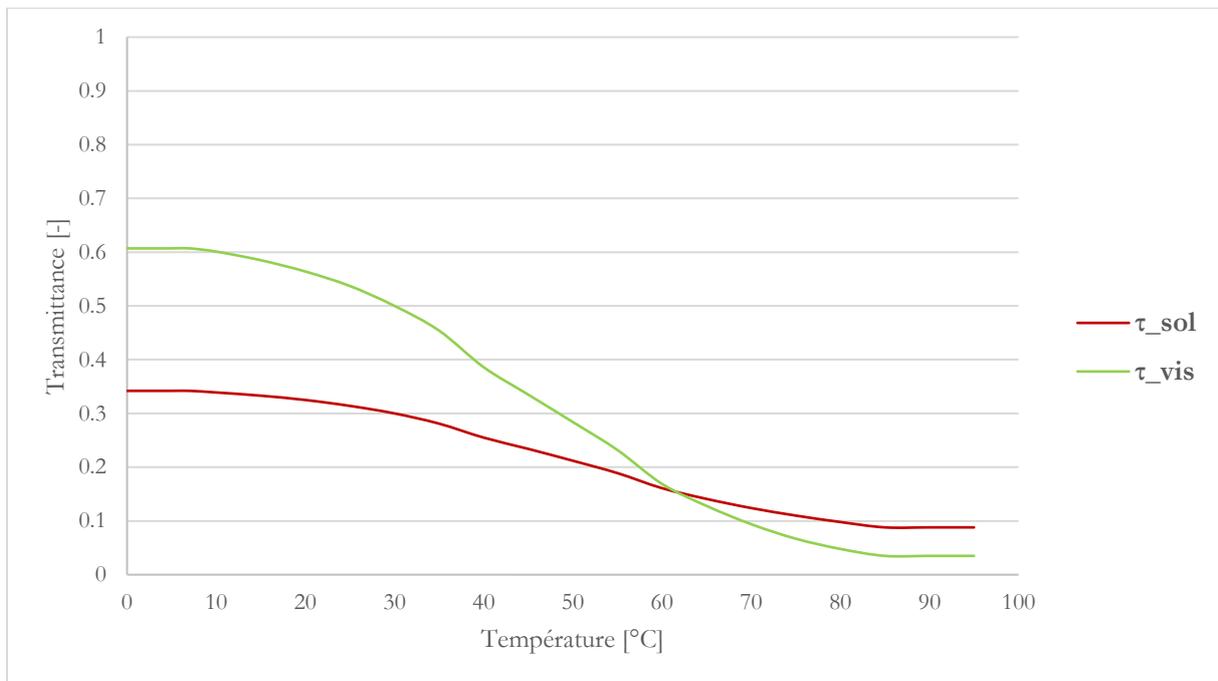


Figure 2-7 : Transmittance solaire et visible du VTC Suntuitive en fonction de la température

Toutes les propriétés thermiques et optiques sont des grandeurs totales et globales pour une incidence nulle.

La technologie Suntuitive est un vitrage thermochrome avec une plus grande absorptance que réflectance. On observe, sur la Figure 2-7 et le Tableau 2-2, la transmittance solaire et visible en fonction de la température du VTC. Par exemple, pour la transmittance solaire (respectivement, transmittance visible), l'état le plus clair dans les températures froides est à 0.342 (respectivement, 0.607) et dans l'état le plus teinté à 0.088 (respectivement, 0.035) dans les températures les plus chaudes.

2.1.2 Stations météorologiques

Les variables météorologiques extérieures sont essentielles en physique du bâtiment, car elles servent à résoudre les modèles mathématiques ou physiques en servant de conditions aux limites : pour effectuer les simulations et prédire les conditions intérieures.

Il y a deux stations météo sur site. Ces deux stations permettent de mesurer les variables extérieures suivantes : (la correspondance des numéros est à voir sur les Figure 2-8 et Figure 2-9)

- Station n°1 :
 - (1) Rayonnement solaire horizontal global (W/m^2) ;
 - (2) Rayonnement solaire horizontal diffus (W/m^2) ;
 - (3) Température d'air ($^{\circ}C$) et Humidité relative (%) ;
 - (4) Vitesse (m/s) et direction du vent ($^{\circ}$) ;

(5) Centrale d'acquisition.

- Station n°2 :

(1) Eclairage lumineux global (lux) ;

(2) Eclairage lumineux diffus (Shadeco) (lux) ;

(3) Centrale d'acquisition.

De plus, un pyranomètre a été installé sur la paroi Nord de la LGI pour mesurer le rayonnement solaire vertical global (en W/m^2)

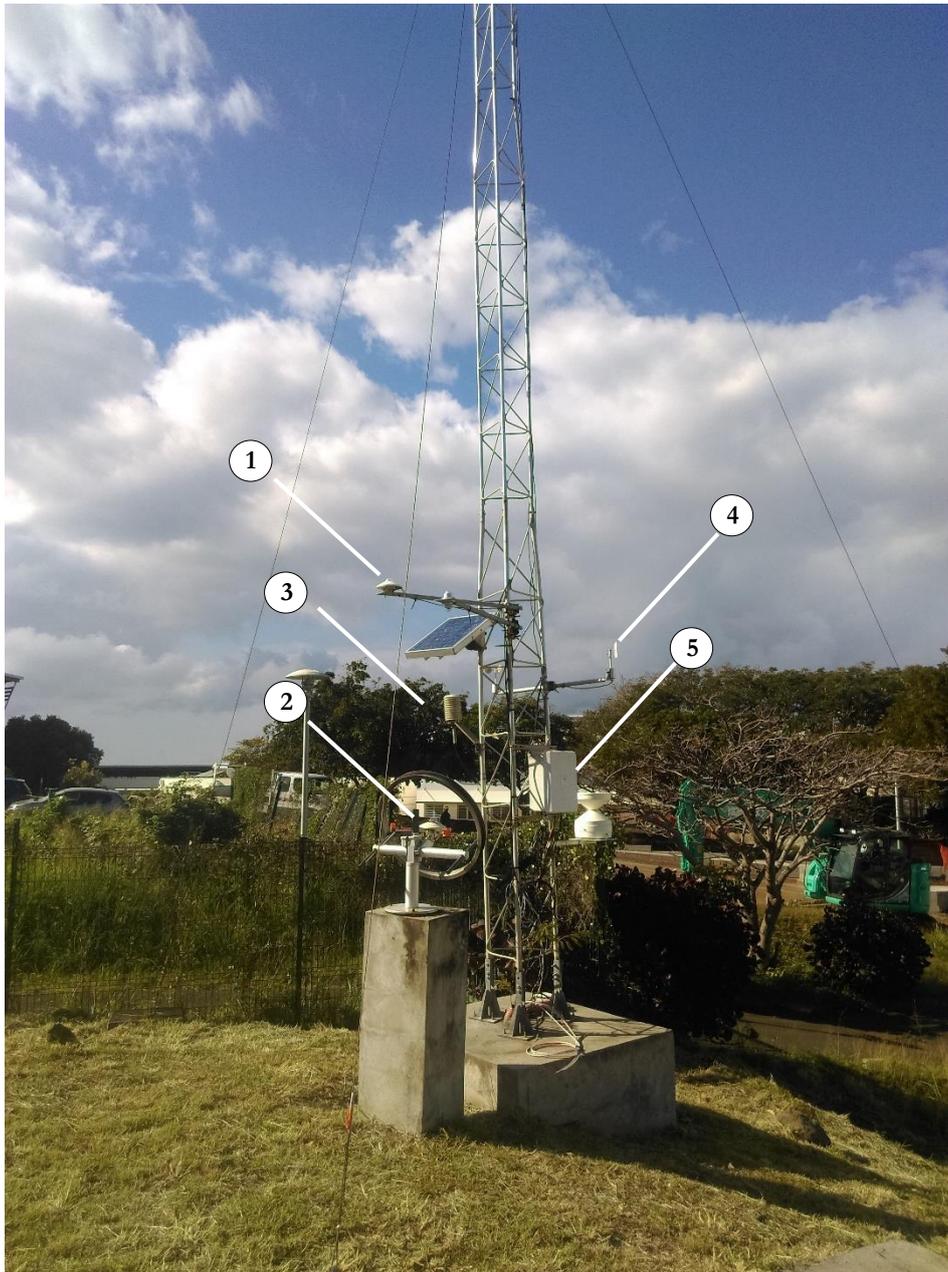


Figure 2-8 : Station météo n°1

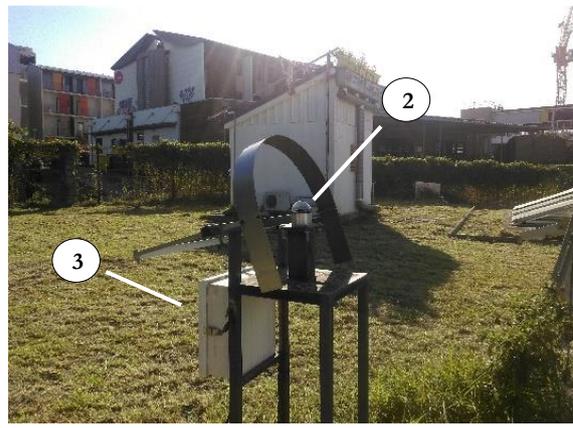
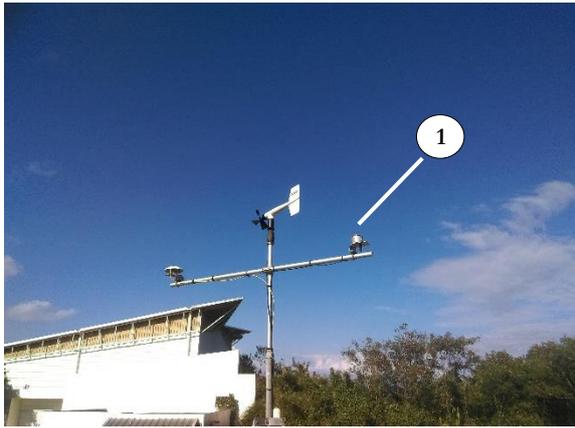


Figure 2-9 : Station météo n°2

Un anneau d'ombrage « low-cost » surnommé Shadeco a été dimensionné et construit en 2013 pour les mesures d'éclairement lumineux diffus horizontal extérieur et les besoins expérimentaux durant la thèse de Malet-Damour (2015).

2.1.3 Stations portables des mesures intérieures

L'objectif de ces mesures sont dans un premier temps de comprendre le comportement thermique du VTC soumis aux conditions météorologiques. Ensuite, cela servira à appréhender l'impact du VTC sur les conditions intérieures de répartition de la chaleur transmise ainsi que le niveau d'éclairement lumineux au sein de la pièce. Les paramètres intérieurs à mesurer sont choisis pour répondre à ces objectifs.

En tout, 49 capteurs ont été utilisés pour cette étude expérimentale :

- 1 Température d'air (°C) avec cylindre en aluminium ;
- 1 Température de globe noir (°C) ;
- 6 Thermocouples de surface des parois (plafond, mur et sol) (°C) ;
- 10 Thermocouples de surface extérieur et intérieur du VTC (°C) ;
- 16 Thermocouples de la menuiserie en bois extérieur et intérieur du VTC (°C) ;
- 14 luxmètres Niveau d'éclairement dans la cellule (lux).

2.1.3.1 Thermocouple

Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples de type K pour les parois et de type T pour la surface du verre. Tous les thermocouples ont été calibrés dans un bain thermo-staté à l'aide d'un étalon avant d'être installés dans la cellule. La marge d'erreur a été évaluée à ± 0.5 °C.

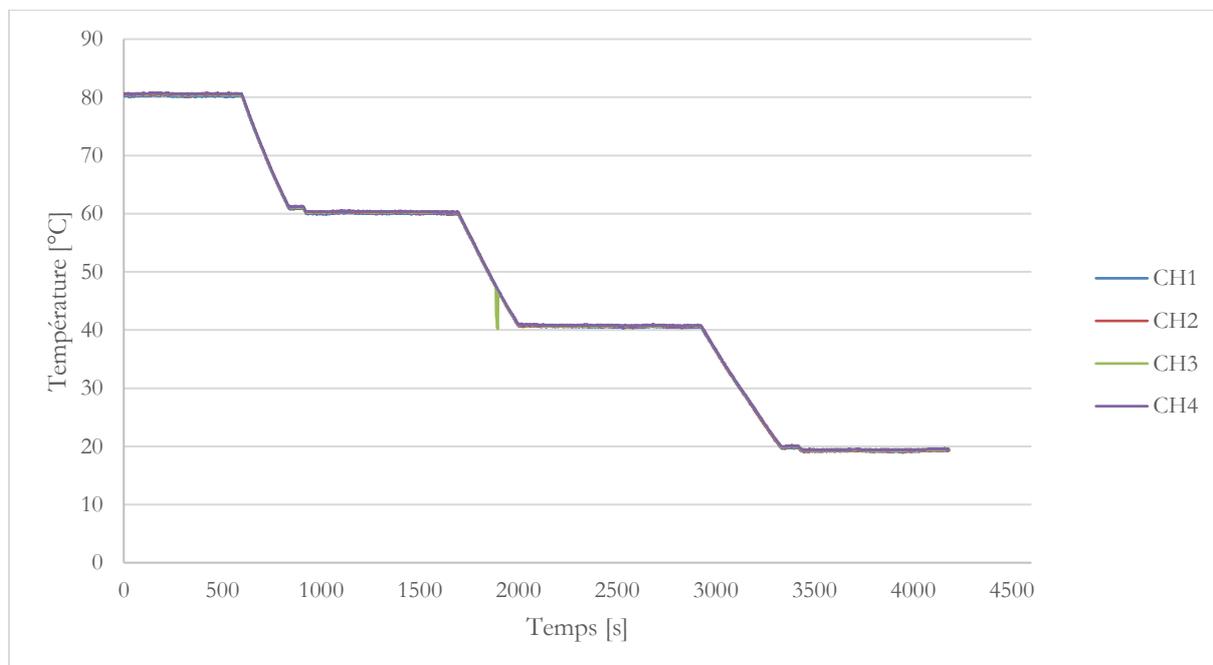


Figure 2-10 : Séquence d'étalonnage pour les thermocouples

Les transferts de chaleur du sol étant difficiles à appréhender, et la température du sol intervenant comme condition aux limites pour le modèle numérique, nous avons placé un thermocouple en dessous des dalettes. Cela nous a permis de nous affranchir de la problématique liée aux phénomènes physiques se déroulant dans le sol.

La cellule est équipée dans sa toiture d'un élément à changement de phase. Cet élément a été installé en 2013 pour les besoins expérimentaux de la thèse de Guichard (2013). Pour ne pas entreprendre de lourds travaux dans la toiture et gagner du temps, nous avons décidé de ne pas toucher aux éléments présents et de placer 3 cm d'isolation (polystyrène) en sous face du faux plafond, avec 2 thermocouples de part et d'autre. On va ainsi utiliser la même méthode que pour le sol et forcer la température du faux plafond en conditions aux limites de notre modèle numérique.

Concernant le verre, les thermocouples ont été fixés à l'aide de pâte thermique et d'un adhésif en aluminium. Ceci est la meilleure configuration pour obtenir une mesure fiable concernant les températures de surface du verre. En effet, les propriétés de l'aluminium dans les courtes longueurs d'ondes (CLO) et grandes longueurs d'ondes (GLO) sont intéressantes. Voici les propriétés de l'adhésif aluminium utilisé pour l'expérimentation :

- $\alpha = 0.05$ dans les CLO
- $\varepsilon = 0.05$ dans les GLO

Grâce à ses propriétés, cet adhésif est en mesure de limiter la transmission du rayonnement solaire incident sur le capteur, ce qui évite la déviation de la mesure de température de surface (Garnier et al., 2011).

Nous avons placé 26 thermocouples sur la surface du verre du VTC. Il y en a 5 sur la surface extérieure et 5 sur la surface intérieure du VTC. Nous avons aussi placé des thermocouples entre

la menuiserie et le verre : 8 intérieurs et 8 extérieurs. Ces 8 dernières mesures permettront de mieux connaître les conditions aux limites du modèle numérique sur le pourtour du VTC perpendiculairement aux principaux flux en jeu (rayonnement solaire, échanges de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur à travers la paroi). Ces mesures permettront donc de s'affranchir de phénomènes de pont thermiques dans un premier temps et faciliteront ainsi la validation du modèle numérique. Sur la Figure 2-11 disposition des thermocouples sur le VTC.

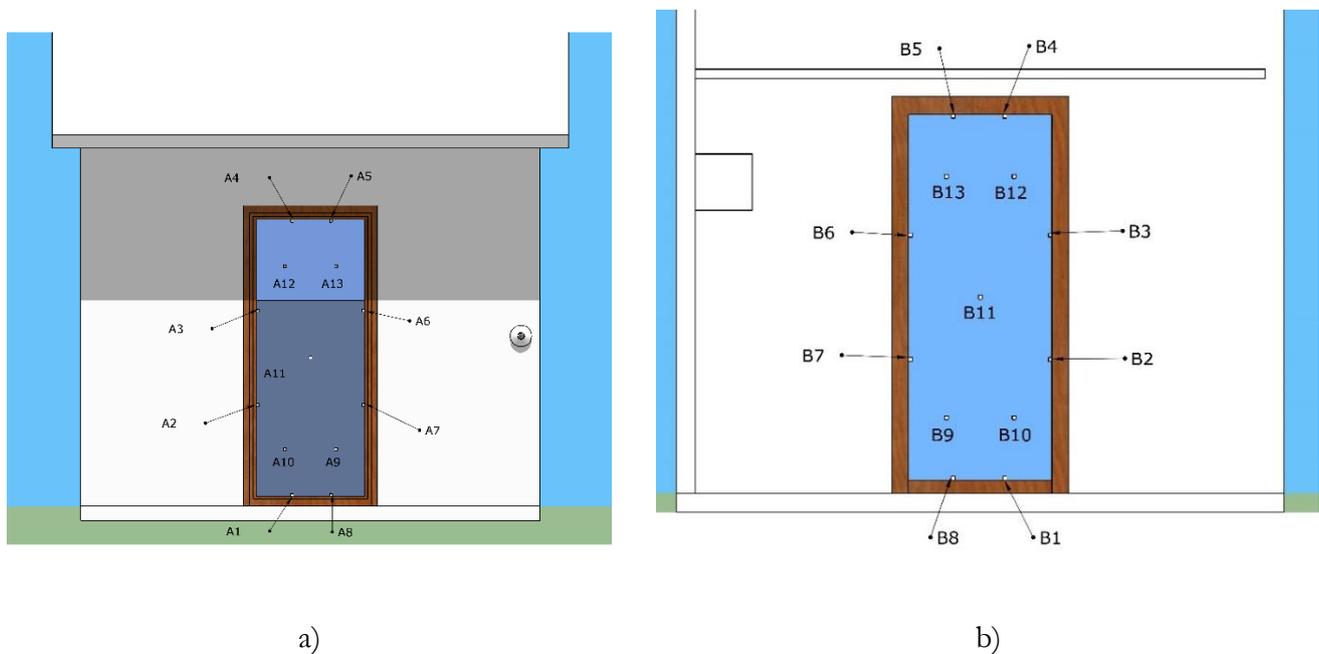


Figure 2-11 : Position des thermocouples sur le verre et dans le châssis a) Vue de l'extérieur b) Vue de l'intérieur

Tous les capteurs de température sont reliés à une centrale Campbell CR3000 avec un multiplexeur AM25T. Ces mesures se font en continu. La CR300 est régulièrement synchronisée avec un ordinateur portable et chaque séquence a été programmée pour mesurer une valeur par minute. Dans le Tableau 2-3, un exemple du format d'une séquence extraite de la CR3000 est présenté.

Tableau 2-3 : Exemple du fichier de sortie de la CR3000

Date	Tp_plafond (°C)	Tsol (°C)	Tp_est (°C)	Tp_nord (°C)	Tp_ouest (°C)	Tp_sud (°C)	T _{rm} (°C)	T _{air} (°C)	Rglo_v [W/m²]	A8 (°C)	A9 (°C)	A10 (°C)	A11 (°C)	A12 (°C)	A13 (°C)
06/09/2018 12:00	28.32	24.68	25.01	24.65	24.73	23.58	24.32	23.85	573.1	48.26	55.58	51.35	52.95	35.09	36.84
06/09/2018 12:01	28.32	24.69	25.01	24.66	24.73	23.59	24.27	24.05	566	48.31	55.65	51.34	52.91	35.1	36.84
06/09/2018 12:02	28.3	24.7	25.02	24.69	24.74	23.6	24.33	24.32	562.5	48.36	55.72	51.45	52.97	35.12	36.88
06/09/2018 12:03	28.27	24.71	25.03	24.71	24.74	23.6	24.47	24.51	563.6	48.41	55.78	51.49	53.04	35.17	36.9
06/09/2018 12:04	28.27	24.73	25.04	24.73	24.75	23.59	24.62	24.59	564.1	48.46	55.72	51.51	52.94	35.11	36.85
06/09/2018 12:05	28.36	24.75	25.06	24.76	24.76	23.58	24.77	24.73	557.8	48.51	55.85	51.51	53.06	35.16	36.95
06/09/2018 12:06	28.36	24.77	25.08	24.79	24.77	23.57	24.9	24.85	556.7	48.56	55.85	51.52	53.05	35.13	36.96

2.1.3.2 Luxmètres

Le but de ces mesures est d'observer la répartition de l'éclairage au sol et de voir l'impact du VTC sur le niveau d'éclairage.

14 luxmètres ont été disposés au sol de LGI pour former un maillage pour mesurer la répartition de l'éclairage. Tous les luxmètres sont passés par un protocole de calibration pour estimer la marge d'erreur et appliquer la rectification à la mesure. Nous avons plongé les luxmètres dans une ambiance fermée à parois noires avec un éclairage étalon. Cela a permis de déterminer le facteur de calibration de chaque luxmètre, qui a servi de facteur multiplicateur pour la centrale ALMEMO.

Sur la Figure 2-12, la disposition des luxmètres est présentée. Tous les luxmètres sont reliés à deux centrales ALMEMO. Il y a 9 luxmètres sur une centrale et 5 sur l'autre. Ces centrales ont une capacité de stockage limitée à environ 8 jours. Les séquences de mesures ont toutes été programmées à l'avance et les centrales synchronisées avec le même ordinateur portable que la CR3000.

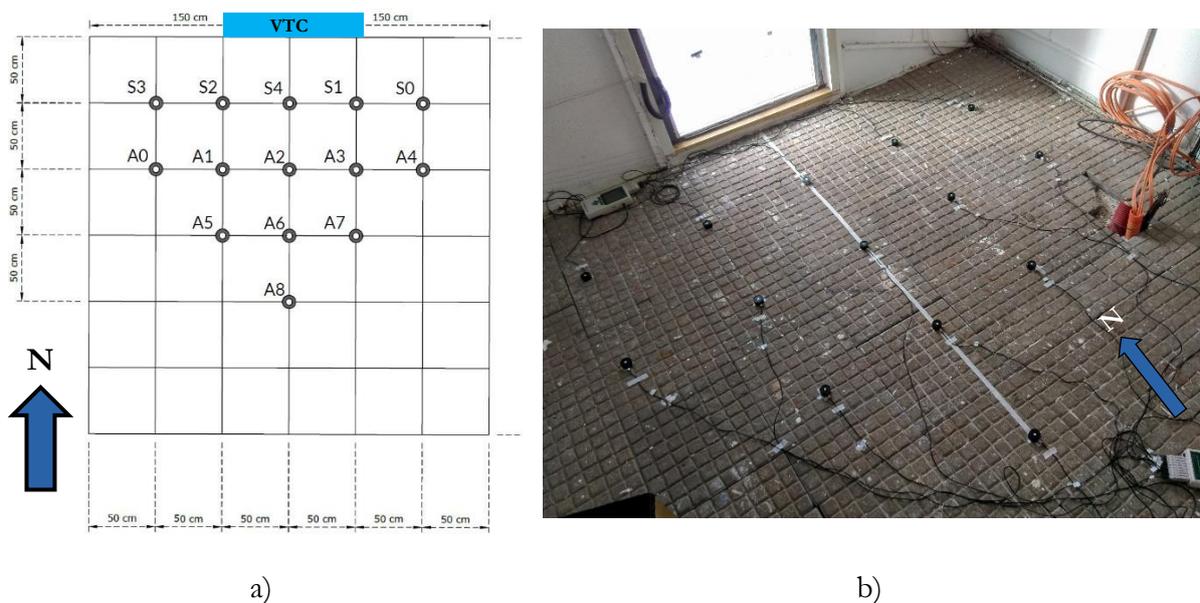


Figure 2-12 : Disposition des luxmètres a) schéma et dimensions des espacements b) Photo de l'installation réelle dans la LGI

Cette configuration de luxmètres nous permet de mieux appréhender la répartition de l'éclairage naturel au sol, et surtout de l'éclairage diffus venant du vitrage.

Dans le Tableau 2-4, un exemple de sortie de fichier de la centrale ALMEMO.

Tableau 2-4 : Exemple du fichier de sortie de l'ALMEMO

DATE:	TIME:	M00: lx	M01: lx	M02: lx	M03: lx	M04: lx	M05: lx	M06: lx	M07: lx	M08: lx
12.08.18	11:00:00	769	9088	999	738	498	817	715	613	604
	11:01:00	752	9086	999	737	496	817	714	610	601
	11:02:00	735	9060	1003	737	496	816	717	611	602
	11:03:00	726	8962	1005	741	498	815	717	612	602
	11:04:00	712	8767	1002	738	496	814	715	611	600
	11:05:00	701	8688	1007	742	499	815	717	614	602
	11:06:00	697	8764	1014	745	502	818	721	617	606
	11:07:00	686	8863	1013	743	499	814	717	614	602
	11:08:00	677	8843	1015	741	497	813	716	612	600

2.2 ETUDE EXPERIMENTALE ET ANALYSE DES RESULTATS

L'étude expérimentale de cette thèse a débuté le 20 Juin 2018 et a pris fin le 29 Septembre 2018. Au total 12 séquences de mesures ont été récoltées. Chaque séquence comporte entre 5 et 6 journées complètes de mesures. Cette période a été choisie selon la course du soleil. En effet, le soleil se trouve à ce moment de l'année au Nord et assez bas dans le ciel (hauteur solaire entre 70° et 45° au 12h solaire), ce qui nous assure une bonne exposition au soleil de notre VTC toute la journée avec le maximum de sollicitations sur le VTC (Voir Figure 2-22).

2.2.1 Données des stations météorologiques

Par soucis de présentation, nous allons présenter une séquence de 5 jours comme exemple de données mesurées de l'expérimentation. Ci-dessous, nous allons présenter les résultats pour la période allant du 13 au 17 Septembre 2018 (inclus).

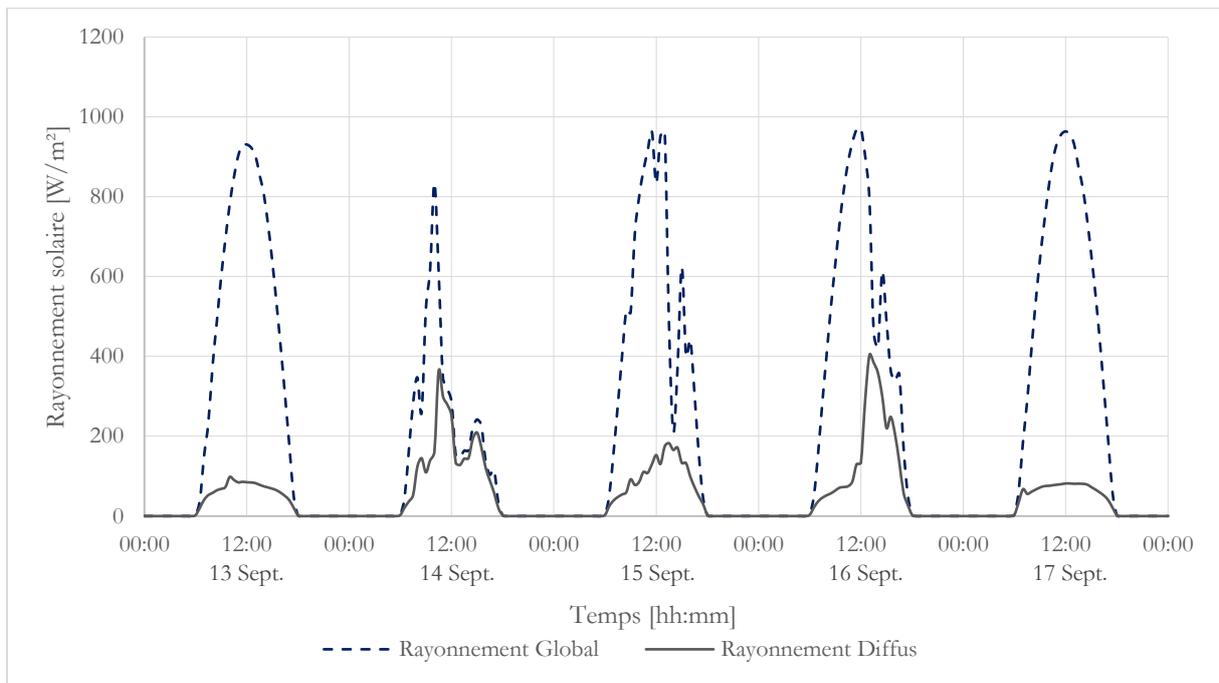


Figure 2-13 : Rayonnement solaire global, diffus et direct sur un plan horizontal pour la séquence du 13 au 17 Septembre 2018

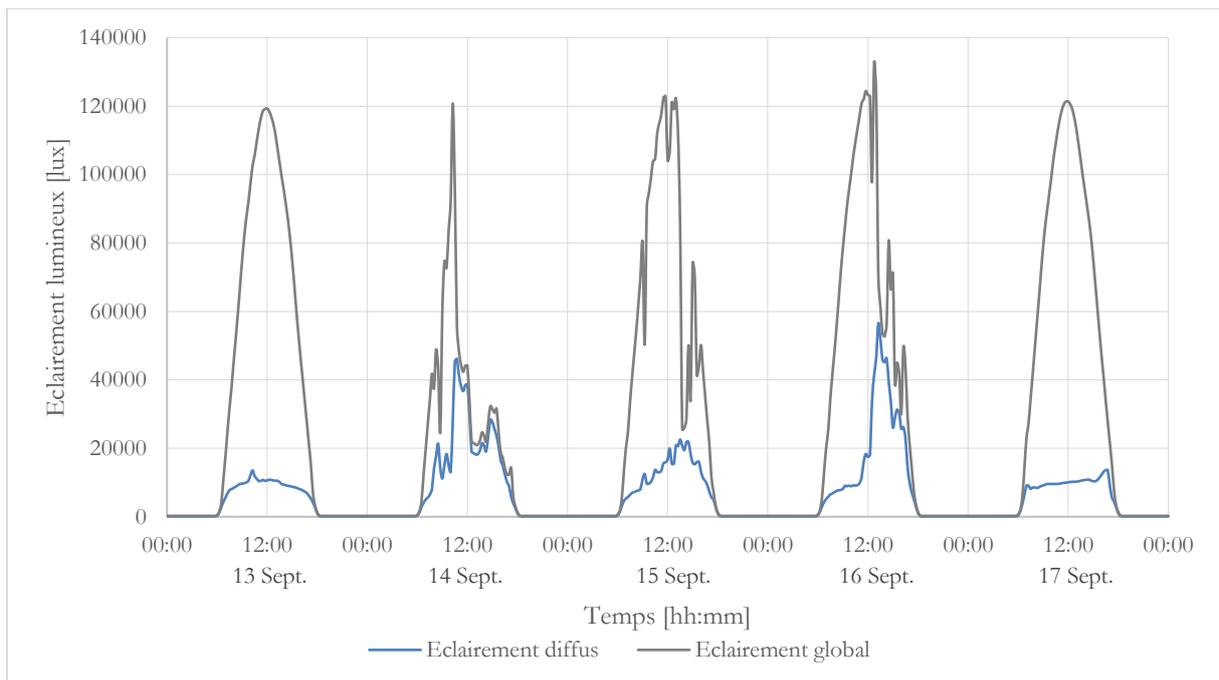


Figure 2-14 : Eclairage lumineux diffus et global sur un plan horizontal pour la séquence du 13 au 17 septembre 2018

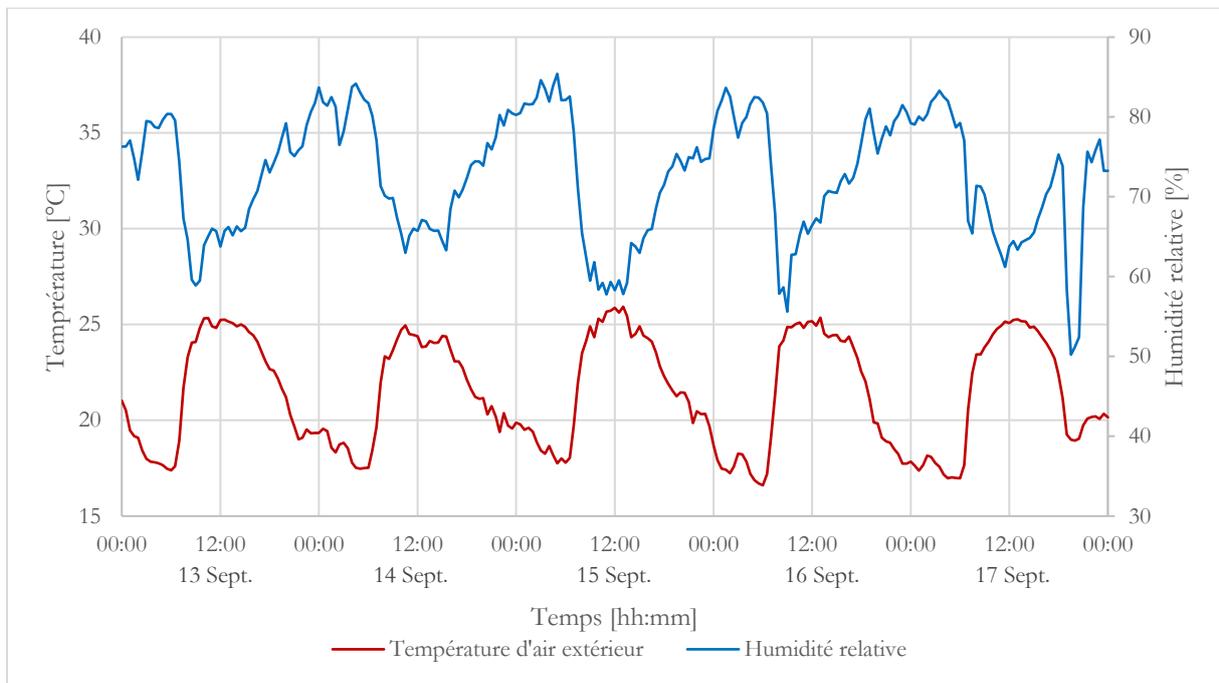


Figure 2-15 : Température d'air sèche et humidité relative extérieure pour la séquence du 13 au 17 Septembre 2018

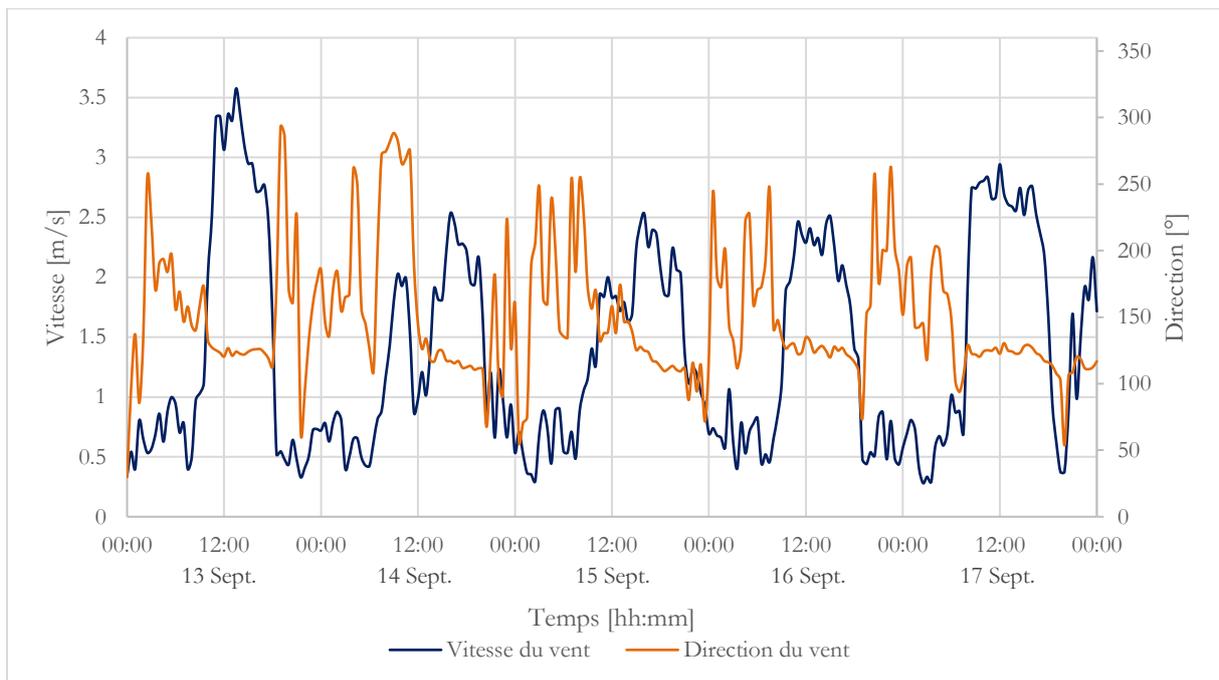


Figure 2-16 : Vitesse et direction du vent pour la séquence du 13 au 17 Septembre 2018

Sur la Figure 2-13, on constate que la séquence comporte de nombreuses journées avec un rayonnement global horizontal maximum entre 830 et 970 W/m² (aux alentours de 12h00). Les 13 et 17 Sept., nous sommes en présence d'un temps ensoleillé avec ciel clair. En effet, les courbes de rayonnement sont lisses et forment une parabole régulière. Cependant, on relève aussi que dans cette séquence, nous avons un ensoleillement parfois similaire à celui d'un ciel nuageux ou couvert, comme pour le 14 Sept. (2^{ème} jour de la séquence), ou à partir de 10h40, le rayonnement global

chute et est environ égal au rayonnement diffus horizontal. On est ici en présence d'un ciel couvert. Un phénomène différent est observable les 15 et 16 Sept., où le rayonnement global oscille entre des valeurs hautes et basses : on est ici en condition partiellement nuageuse.

Sur la Figure 2-14, l'éclairement lumineux global et diffus sont représentés pour la séquence du 13 au 17 Sept. 2018. L'éclairement global maximum atteint 120 klux aux alentours de 12h00. On peut tirer les mêmes conclusions concernant le type de ciel que pour la figure précédente. On peut aussi ajouter que le gisement extérieur est important mais cohérent avec des valeurs caractéristiques des climats tropicaux (Malet-Damour, 2015).

Sur la Figure 2-15, on observe les cycles de température d'air qui varie entre 16 °C (pendant la nuit) et 26 °C (aux alentours de 12h00). Concernant, l'humidité relative la courbe varie entre 86 % (pendant la nuit) et 49% (pendant la journée). Ce sont des valeurs normales pour la fin de l'hiver dans les bas de La Réunion.

Sur la Figure 2-16, la vitesse du vent, peut atteindre au maximum jusqu'à 4.4 m/s pendant la journée. On peut noter pendant la journée, quand le vent est fort, que la direction du vent vient du Sud-Est. Cependant, on constate de fortes fluctuations pendant la nuit jusqu'au matin vers 8h00, où les valeurs de vitesse sont faibles. Ces données correspondent aux caractéristiques d'une localisation sur la côte exposée au vent pendant l'hiver (régime des Alizés).

2.2.2 Résultats expérimentaux mesurés à l'intérieur de la cellule

L'objectif de cette expérimentation est d'observer le comportement du vitrage thermochrome soumis au rayonnement solaire et aux conditions extérieures et de récolter les données nécessaires à la validation du modèle proposé dans cette thèse. De plus, nous pourrons aussi vérifier l'impact du VTC sur les conditions de confort thermique et visuel dans des conditions de fonctionnement in situ.

Nous allons présenter les mesures récoltées sur le vitrage et du rayonnement global vertical dans le plan de la paroi Nord pour la séquence du 13 au 17 Septembre 2018.

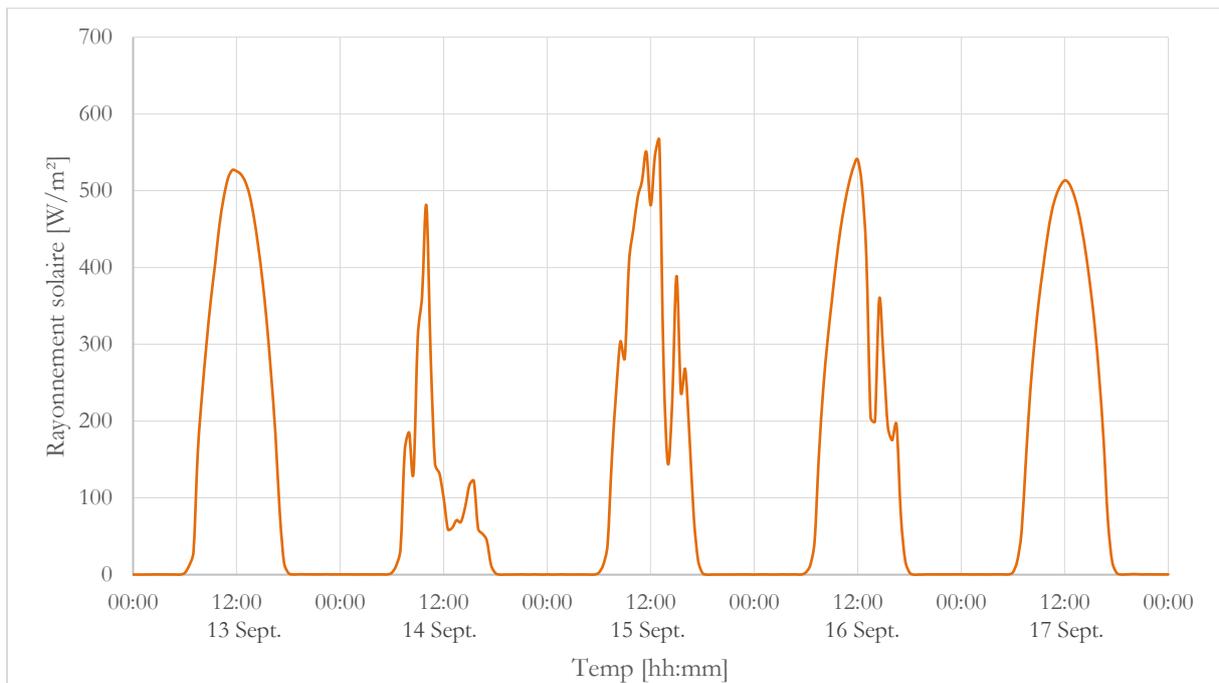


Figure 2-17 : Rayonnement solaire global sur un plan vertical (Paroi Nord de la LGI)

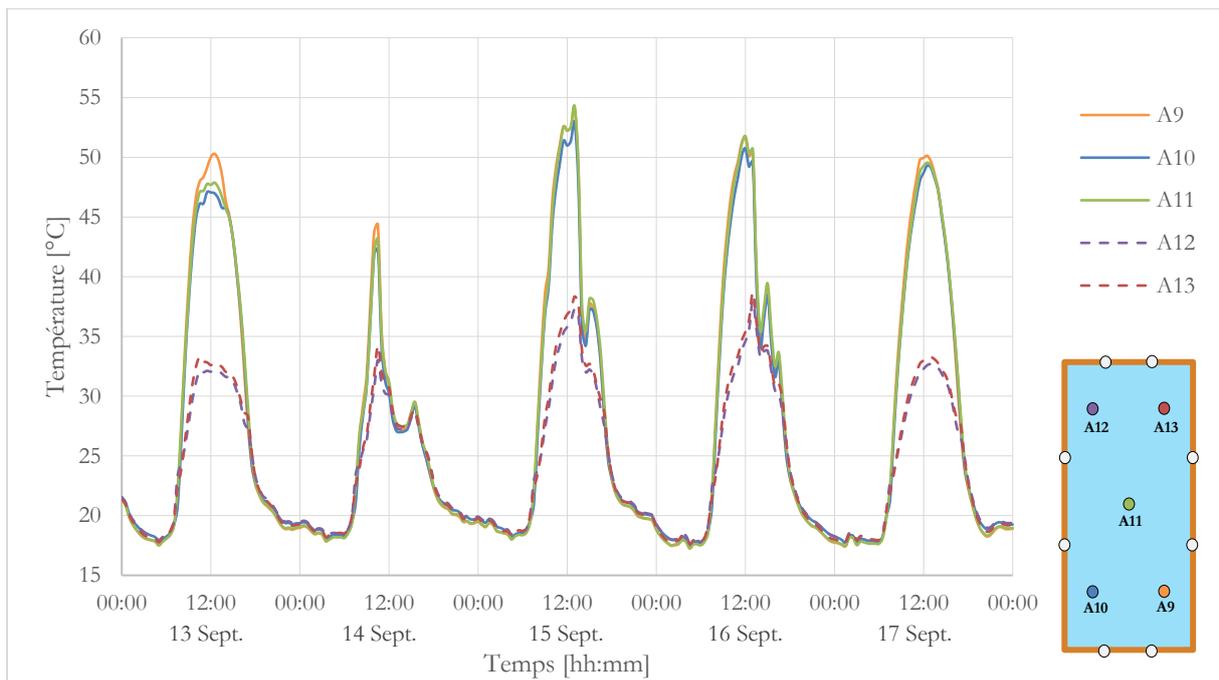


Figure 2-18 : Profil de température de surface extérieure du VTC

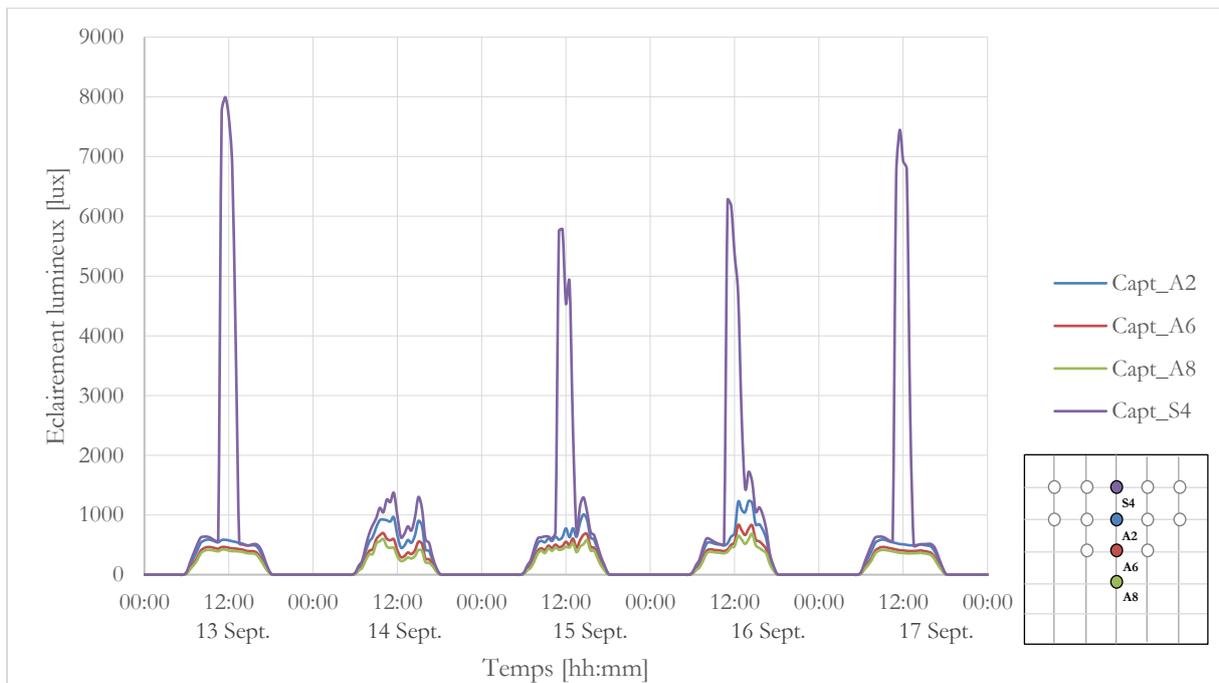


Figure 2-19 : Profil d'éclaircement sur l'axe central par rapport au vitrage

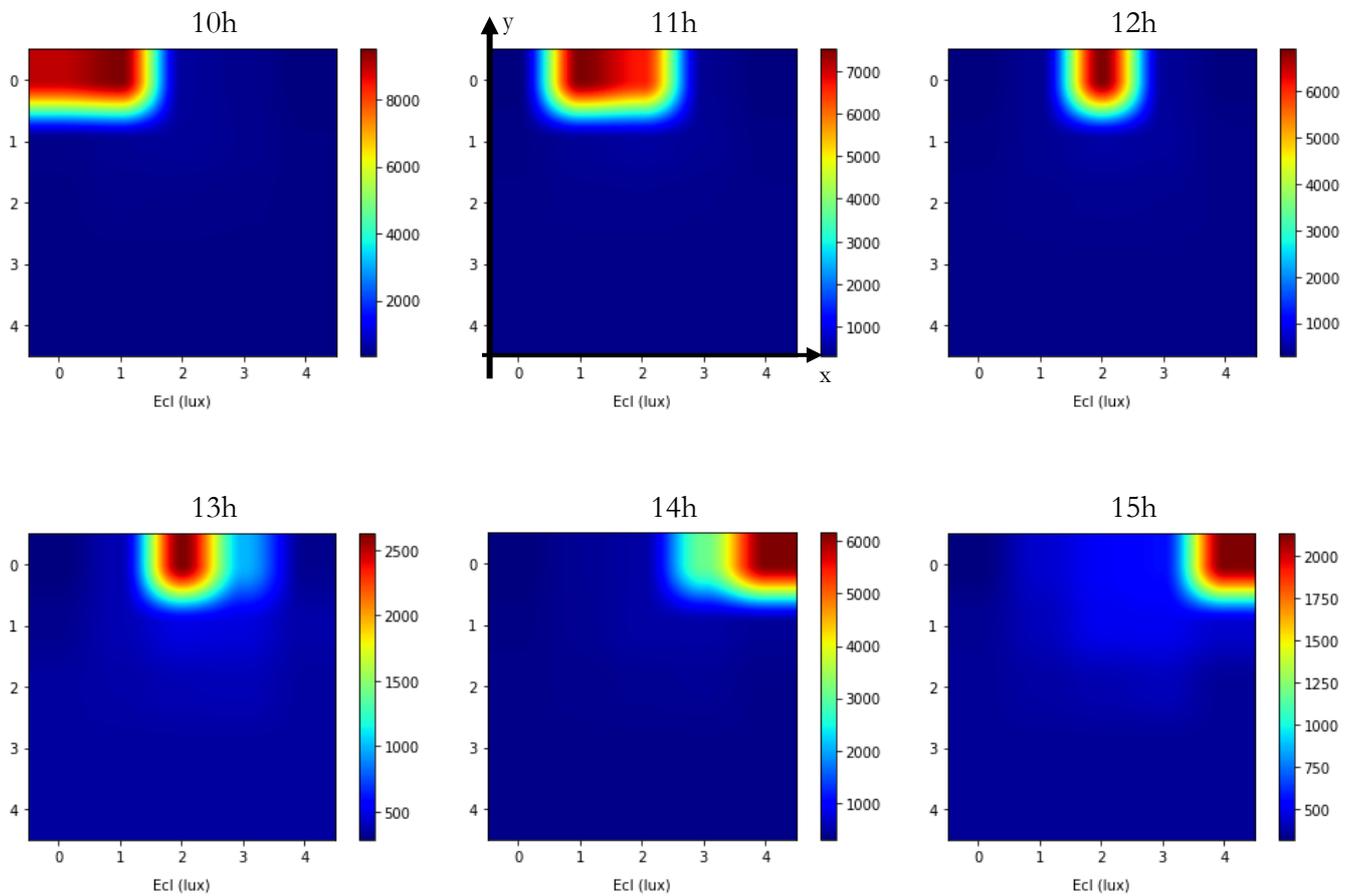


Figure 2-20 : Répartition de l'éclaircement au sol (en lux) pour le 17 Septembre 2018

Sur la Figure 2-17, on constate que le profil du rayonnement vertical a la même tendance que celui du rayonnement sur un plan horizontal (Figure 2-13), mais avec une intensité plus faible, les valeurs maximales sont comprises entre 480 et 565 W/m² (aux alentours de 12h00), pour cette séquence.

Sur la Figure 2-18, on observe que pour les capteurs de la moitié basse du vitrage (A9 ; A10 ; A11), les valeurs sont comprises entre 17.5 °C et 54.5 °C et pour les deux autres capteurs (A12 ; A13) les valeurs sont comprises entre 17.5 °C et 38.5 °C. Ce sont des valeurs hautes comparables à des valeurs typiques de température de surface de toiture, ou horizontale, avec une grande différence de température entre la nuit et le jour. On relève ici, pour le capteur A11, un delta de 36 °C, le 15 Sept., par exemple, entre 13h00 et 02h00. On peut aussi ajouter qu'il y a des écarts importants entre la température du VTC et la température d'air extérieur, pendant la journée.

Sur la Figure 2-19, on remarque que l'éclairement utile sur la rangée centrale est toujours au-dessus de 300 lux entre 8h00 et 17h00, même le jour couvert. Cela montre bien que le VTC atténue l'éclairement mais au vu du potentiel extérieur, cela reste suffisant pour une utilisation de type bureau par exemple (CIE, 2002). On voit aussi que le niveau d'éclairement du capteur S4 est 12 fois supérieur aux autres capteurs aux alentours de 12h00 : cela est dû à la position du soleil pendant cette séquence qui provoque une tache solaire au niveau de ce capteur. On peut aussi ajouter que la quantité de lumière à l'intérieur représente un très faible pourcentage du potentiel extérieur : environ 0.42% pour les capteurs A2, A6 et A8 au zénith.

Sur la Figure 2-20, on constate la répartition de l'éclairement au sol pour la journée du 17 sept., entre 9h et 15h. Globalement, on voit l'évolution de la tâche solaire au sol et surtout que son niveau d'éclairement diminue au fil du temps alors que le potentiel extérieur augmente. Le niveau d'éclairement dans la tâche solaire passe de 10 000 lux à 10h à 7 000 lux à 12h. On assiste ici, à l'effet de diminution de la transmission lumineuse quand la température du vitrage augmente (42.5° à 10h et 49.2 °C à 12h).

La première analyse qu'il est possible de faire est temporelle. En effet, les données de température de la surface du VTC sont directement liées au rayonnement solaire incident. Les évolutions temporelles des profils de température de surface et de rayonnement solaire sont similaires.

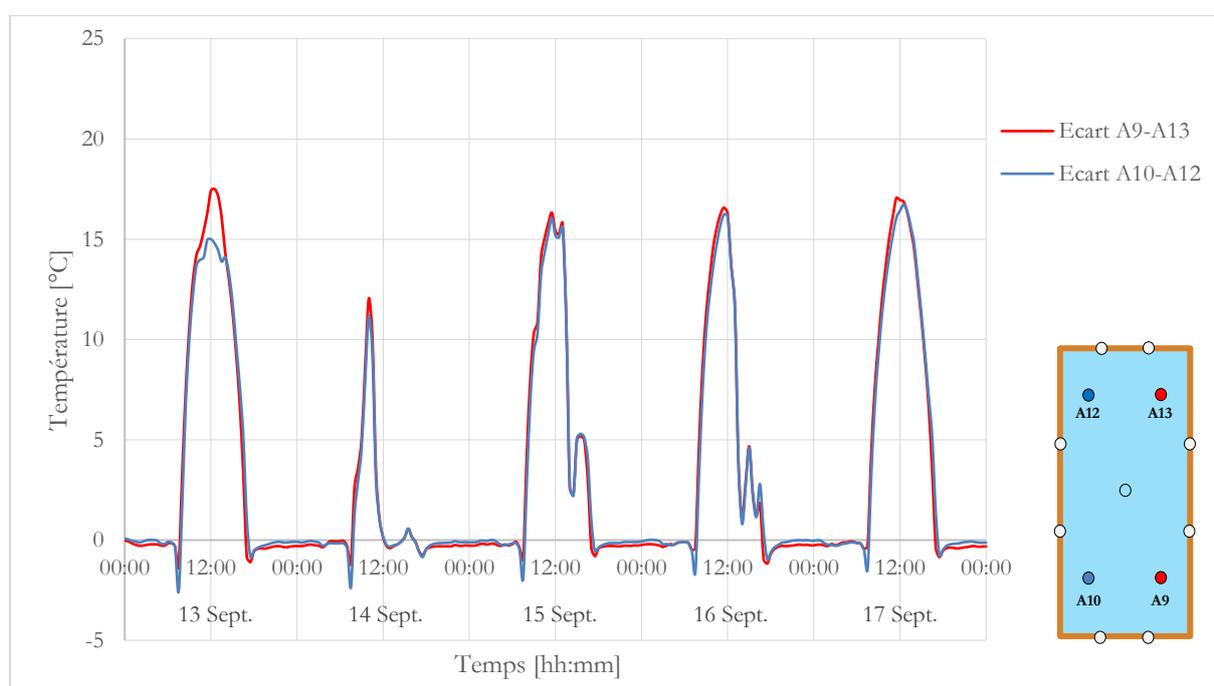
On peut remarquer que les jours de beau temps où la courbe du rayonnement solaire a une forme presque parabolique, la courbe de température suit la même tendance. En revanche, si on regarde le 2^{ème} jour de cette séquence, on voit que le rayonnement est très sporadique et avec un profil irrégulier. Cela est dû à la couverture nuageuse de ce jour. On fait la même observation que précédemment, le profil des courbes de température est similaire à celui du rayonnement.

La deuxième analyse est spatiale. En effet, il y a une différence de température entre les capteurs en partie basse (A9 & A10) et ceux en partie haute (A12 & A13) du VTC. On constate, par exemple, une différence de 17.5°C environ à 12h00 pour le 13 Sept., entre le capteur A9 et A13 comme on peut le voir sur la Figure 2-18.

Pour mieux mettre en évidence ce phénomène, nous avons tracé l'écart entre la température située en partie basse et celle en partie haute.

Sur la Figure 2-21, on constate l'évolution de l'écart de température entre le capteur A9 et A13, ainsi qu'entre le capteur A10 et A12. On observe, par exemple pour le 17 Sept, que pendant la nuit, l'écart A9-A13 est nul puis devient brièvement négatif vers 7h30, il atteint une différence de 17.0°C à 11h00. Globalement, pendant la journée la température des capteurs A9 et A10 est supérieure aux capteurs A12 et A13, lors de cette séquence, et s'équilibre pendant la nuit.

Il est important de noter que l'écart diminue fortement voir s'approche de zéro, pendant les périodes où la couverture nuageuse est plus importante, comme par exemple le 15 Sept. Entre 12h00 et 18h00. Cela s'explique par le fait que l'ensemble du VTC se trouve dans des conditions d'exposition au rayonnement quasi similaires.



Cette différence de température s'explique par le fait que les capteurs A12 et A13 sont à l'ombre pendant les heures d'exposition (entre 8h et 17h). L'ombre est provoquée par le débord de toiture de la LGI, comme on peut le voir sur les représentations en 3 dimensions et projections d'ombre du logiciel SketchUp (Figure 2-22)

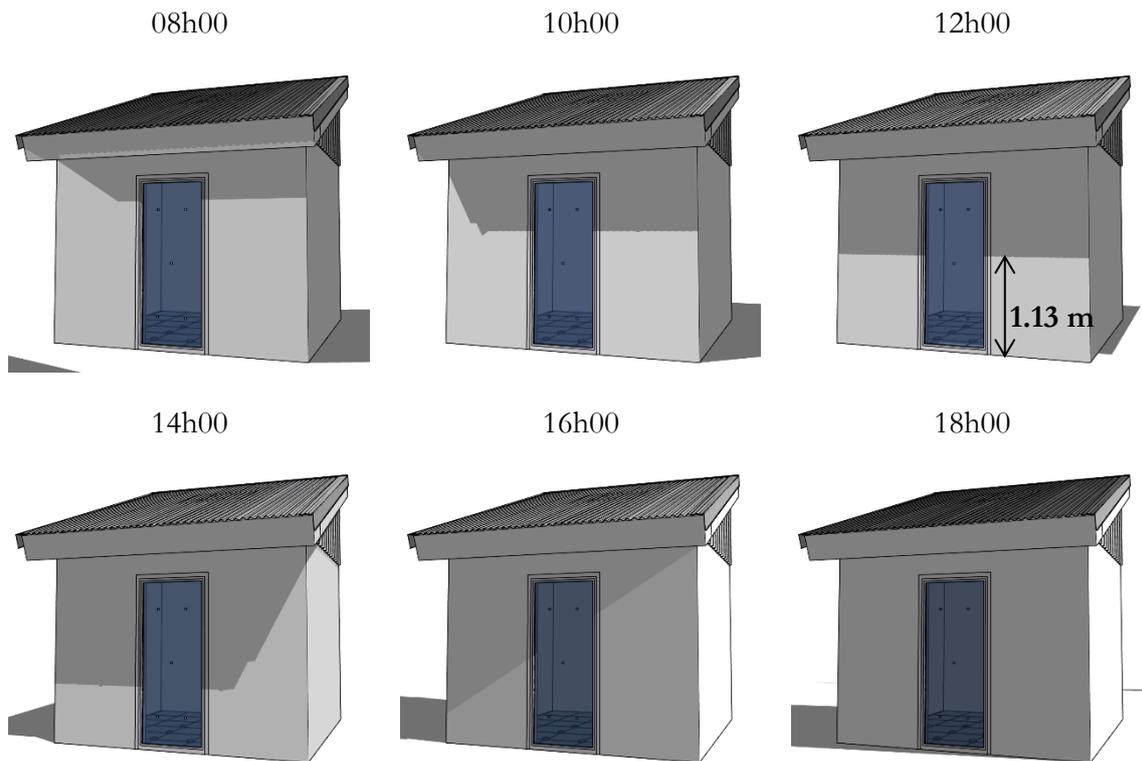


Figure 2-22 : Représentation en 3D des ombres projetées sur le LGI et le VTC pour le 17 Septembre (SketchUp)

Par exemple le 17 Sept. à 12h00, la hauteur de la partie exposée est de 1.13m (en partant du bas de la LGI). Ce qui place les capteurs A12 et A13 bien à l'ombre alors que les autres sont exposés au rayonnement solaire. Donc les capteurs dans la partie ombragée vont absorber moins de rayonnement et avoir un rythme d'échauffement plus lent et moins intense que les capteurs dans la partie exposée. S'il y a une différence de température, il y a donc différence de transmittance (ainsi que d'absorptance). Cela veut dire que le champ de température et de transmittance du VTC est hétérogène. Ce phénomène est aussi observé à l'œil nu lors du changement de couleur du VTC, comme on peut le voir sur la Figure 2-23.

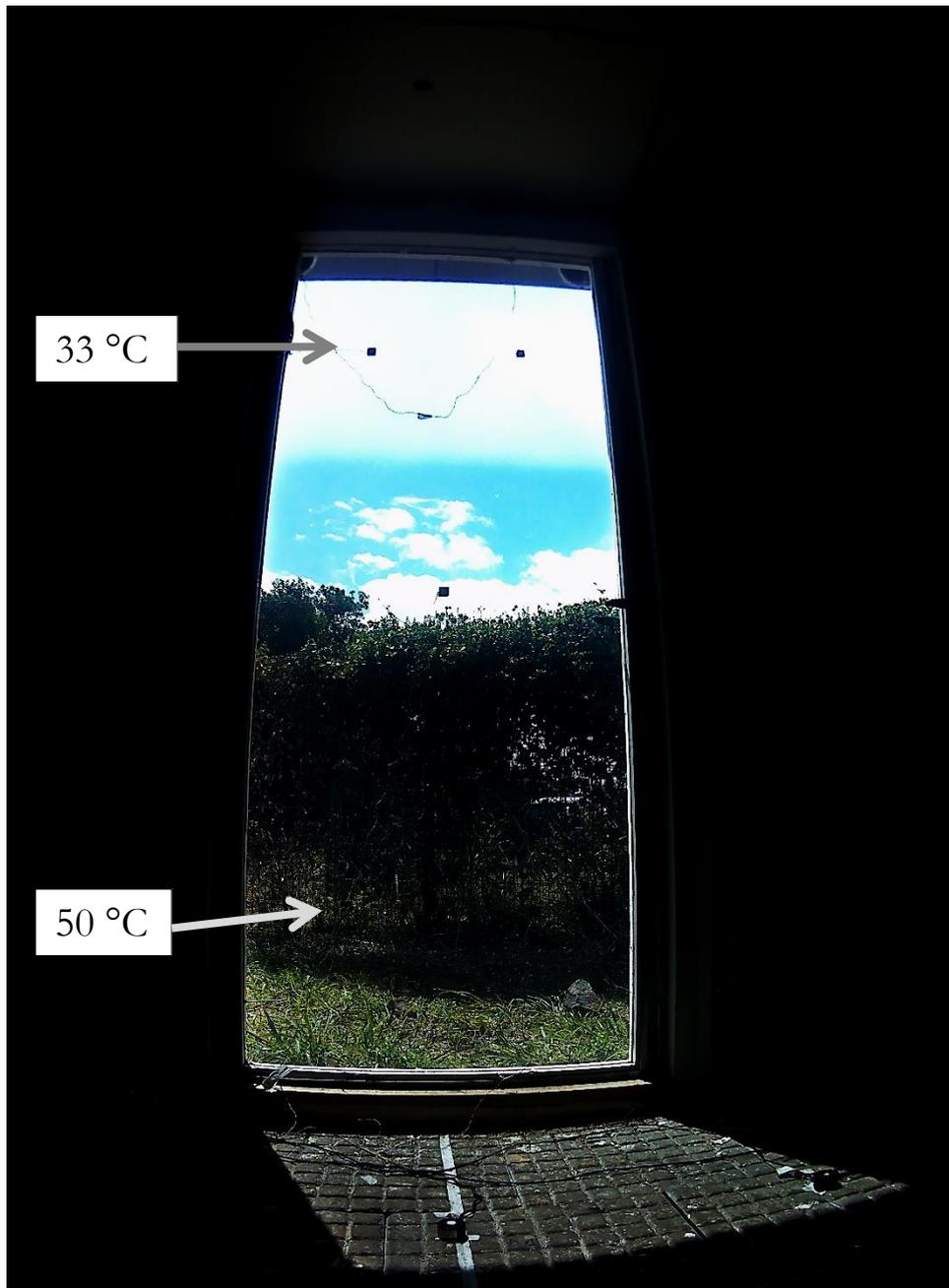


Figure 2-23 : Répartition hétérogène de la couleur du VTC/ Vue de l'intérieur de la LGI (photo prise le 13 Sept. 2018 à 12h49)

Cette observation expérimentale nous amène à la conclusion que pour correctement modéliser le comportement du VTC, il faudra prendre en compte de manière précise la répartition du rayonnement solaire, ainsi que les masques proches et lointains. Cela permettra d'évaluer avec précision les différents états du VTC selon sa température, et ensuite les conditions de transmission de l'énergie thermique et lumineuse au sein de la cellule.

2.3 CONCLUSIONS

Nous avons vu lors de ce chapitre la description de l'expérimentation mis en place pour cette thèse. Sur la cellule test LGI, nous avons remplacé la porte vitrée par une nouvelle porte avec le vitrage contenant la technologie thermochrome.

Ce dispositif expérimental innovant, nous permet de faire des mesures en situation réelle sur le vitrage thermochrome. Ainsi, 26 thermocouples ont été installés sur le verre et dans la menuiserie pour suivre l'évolution du champ de température lorsque le VTC est soumis au rayonnement solaire. Les résultats de l'expérimentation ont montré que :

- Les valeurs mesurées en surface du verre sont élevées par rapport à des valeurs de parois verticales dans les mêmes conditions
- Le profil de température du verre thermochrome est similaire à celui du rayonnement incident.
- Il existe un écart de température entre des positions basses et hautes sur le VTC. Cet écart est dû à la présence d'un débord de toiture qui fait masque sur les capteurs hauts pendant les heures d'exposition. Les capteurs en partie haute sont dans la partie ombragée et plus froide alors que les capteurs en partie basse sont exposés et plus chauds.

Pour conclure, l'expérimentation nous montre qu'il est important de prendre en compte les maques proches et lointains, ainsi que la course du soleil, pour pouvoir prédire le comportement thermique du VTC. Cette représentation fidèle du VTC nous mènera vers une modélisation en deux dimensions sur la surface du verre soumis au rayonnement solaire. La modélisation représentera les transferts en thermique ainsi qu'en éclairage naturel. Grâce à cela, nous serons capables de mieux prendre en compte l'impact de ce type de vitrage dynamique dans les codes de simulations et ainsi prédire les conditions de confort thermique et visuel à l'intérieur.

Chapitre 3 MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMO- OPTIQUE DU VITRAGE THERMOCHROME SOUMIS AU RAYONNEMENT

Dans ce chapitre, il sera traité de la modélisation du comportement du vitrage thermochrome. L'objectif de ce chapitre est de proposer une amélioration des modèles du vitrage thermochrome (VTC). Dans cette thèse, la modélisation portera sur les domaines physiques de la photométrie en éclairage naturel et de la thermique. Dans un premier temps, il sera exposé la modélisation théorique des phénomènes de transfert à travers un vitrage classique puis il sera abordé les modèles de variations des propriétés thermo-optiques. Dans un second temps, le chapitre traitera de la modélisation en deux dimensions et de la répartition des sollicitations sur la surface du verre. Enfin, un couplage aux codes de calculs 1D existants sera proposé.

3.1 INTRODUCTION AUX MODELES DE LA PHYSIQUE DU BATIMENT

Les codes de simulations thermiques ou photométriques sont utiles pour la conception des bâtiments, pour pouvoir prédire leurs comportements et, ainsi améliorer leur conception en efficacité énergétique et le confort des occupants. L'amélioration des modèles des codes de simulations a une importance capitale dans notre approche de la physique de l'habitat, notamment pour la conception des bâtiments bioclimatiques et durables.

La stratégie de modélisation de cette thèse est de, globalement, modéliser avec fiabilité le comportement du VTC sur deux domaines de la physique du bâtiment : la thermique et la photométrie. Ces modèles doivent pouvoir être implémentés à terme dans le logiciel CODYRUN (Boyer, 1993), logiciel de simulation thermique et photométrique, validé et développé par le laboratoire PIMENT depuis plus de 25 ans (Lauret et al., 2001; Soubdhan et al., 2000) ou tout autre logiciel de simulation de la physique du bâtiment, comme par exemple ISOLAB (Bigot, 2011) ou EnergyPlus (DOE, 2010). Cette stratégie et notre considération du niveau de discrétisation, nous conditionnent à l'utilisation de la méthode des différences finies pour la modélisation des équations de la thermique du bâtiment. Cette méthode est répandue en physique du bâtiment et donne des résultats satisfaisants aux regards des objectifs de conception des bâtiments bioclimatiques.

Plus précisément, le but de la modélisation dans cette thèse est de prendre en compte plus finement les effets d'hétérogénéité du vitrage thermochrome (VTC) quand il est soumis au rayonnement solaire. Dans la physique du bâtiment, en thermique, le vitrage est classiquement représenté par un nœud en 1D. On essaiera donc de mener une réflexion sur la pertinence d'une modélisation en deux dimensions pour mieux représenter le comportement du VTC. La réflexion sur la modélisation en deux dimensions sera faite sur la surface du vitrage pour effectuer les calculs de répartition du champ de température, ainsi que de la transmittance, pour la prise en compte de l'hétérogénéité des sollicitations du vitrage (tâche solaire, ombres portées, ...).

Pour les besoins en modélisation de cette thèse, une plateforme numérique de calcul, nommée PITAYA : **P**latform for the **I**ntegrated **T**hermal and **d**AYlighting **A**nalysis¹², été créée pour effectuer les simulations des modèles de la physique du bâtiment. Le langage Python a été choisi pour PITAYA : c'est un langage de programmation interprété multiparadigme et multiplateforme. De plus, les bibliothèques implémentées comme Numpy, Pandas ou Matplotlib, sont dédiées et adaptées à la programmation scientifique. L'objectif a été de reproduire dans une seule plateforme de calcul une cellule monozone en thermique et en photométrie, simultanément. L'avantage à noter ici, est la simplicité fonctionnelle et structurelle du langage, et la possibilité d'avoir un environnement

¹² Plateforme pour l'analyse intégrée de la thermique et de l'éclairage naturel

connu et maîtrisé pour introduire, par la suite, les nouveaux modèles de comportement du VTC. Ces nouveaux modèles s'appuieront sur les modèles de la physique du bâtiment.

Dans le chapitre 1, il a été vu qu'un vitrage est un matériau semi-transparent (ou translucide), faisant partie de l'enveloppe du bâtiment et qu'il se retrouve donc à l'interface entre l'intérieur et l'extérieur. Le vitrage transmet donc des flux de chaleur et lumineux à l'intérieur, et assure une vision sur l'extérieur. C'est pour cela que les mécanismes d'énergies affectant le vitrage sont de nature :

- Lumineuse ;
- Conductive ;
- Convective ;
- Radiative de grandes longueurs d'ondes ;
- Radiative de courtes longueurs d'ondes ;

L'ensemble de ces phénomènes et leurs modèles associés seront pris en compte et inclus dans la plateforme numérique PITYA.

3.1.1 Transfert par rayonnement de courtes longueurs d'onde (solaire)

Pour le transfert d'énergie de courtes longueurs d'ondes (CLO), cela concerne le rayonnement solaire qui se situe entre 0 et 2.5 μm . En physique, le vitrage est considéré comme un matériau semi transparent par rapport au rayonnement CLO. Cela veut dire que le vitrage a des propriétés particulières et joue un rôle notamment dans le transfert d'énergie solaire à l'intérieur de la pièce. Les propriétés thermiques des vitrages classiques sont dépendantes de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence du flux, et peuvent être mesurées expérimentalement ou calculées théoriquement (si les caractéristiques optiques intrinsèques sont connues).

Pour rappel, le rayonnement solaire passant d'un matériau à un autre est en partie transmis et réfléchi à l'interface entre les deux milieux. De plus, une fraction de ce rayonnement, en traversant l'un des milieux, est absorbé selon l'absorptivité du matériau. Les matériaux, qui n'absorbent pas totalement le rayonnement sont classés comme (semi-) transparents ou translucides. La particularité de la paroi translucide est sa capacité à diffuser la lumière à tel point que les images d'objets vues à travers eux sont floues. Les matériaux qui ne transmettent aucune lumière perceptible sont classés comme parois opaques.

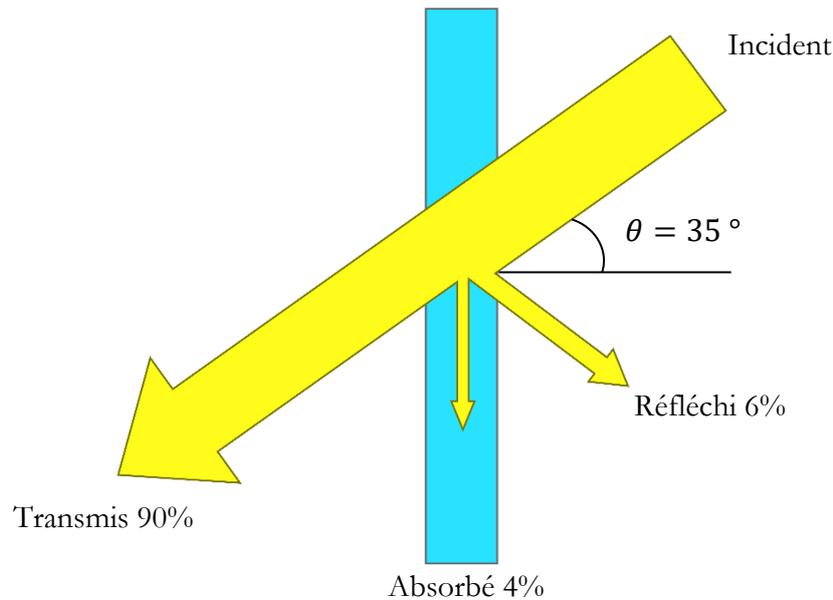


Figure 3-1 : Répartition du flux rayonnement solaire incident (en %) pour une paroi semi transparente

Pour un vitrage semi-transparent, si un flux de rayonnement solaire incident, I_{inc} , est considéré, la transmittance τ , la réflectance ρ et l'absorptance α d'une couche de vitrage, contiennent les effets des multiples réflexions entre les deux faces de la couche, mais aussi les effets de l'absorption durant le passage à travers le matériau de chaque inter-réflexion. Sur la Figure 3-1, par exemple, le flux solaire est réfléchi à 6% et absorbé à 4% donc transmis à 90%.

On définit donc, l'absorptance, la transmittance et la réflectance comme des grandeurs représentant la fraction des flux absorbés, transmis et réfléchis, en incluant les effets des inter-réflexions, sur le flux incident total.

$$\alpha = \frac{I_a}{I_{tot}} ; \quad \tau = \frac{I_{tr}}{I_{tot}} ; \quad \rho = \frac{I_r}{I_{tot}} ; \quad (1)$$

Finalement, la conservation de l'énergie nous donne l'équation suivante :

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (2)$$

De plus, il faut bien faire la différence entre la face avant ou arrière du média semi-transparent, qui peuvent avoir des propriétés différentes selon le sens du flux. Pour un flux incident sur la face avant du vitrage, la réflectance sera nommée la réflectance avant, ρ_{av} , et son opposée sera la réflectance arrière, ρ_{ar} . Dans la plupart des cas, les indices *av* et *ar* seront omis si le vitrage présente les mêmes propriétés sur les faces avant et arrière.

Les propriétés thermiques du vitrage sont dans la plupart des cas des grandeurs totales et globales, et sont données à incidence nulle. Ainsi, pour calculer la quantité d'énergie solaire transmise, il faut prendre en compte des modèles de dépendance angulaire.

Le rayonnement solaire sur une surface quelconque n'est pas toujours à incidence nulle, au contraire une grande partie de l'énergie solaire se transmet, notamment à travers des surfaces vitrées perpendiculaires (par rapport au sol), à angles d'incidence obliques. Ainsi, de nombreuses études ont été menées dans ce sens, pour caractériser la dépendance angulaire des coefficients de transmission car cela a un impact sur les bilans thermiques et énergétiques des bâtiments (Rosenfeld et al., 2001). Sur la Figure 3-2, l'angle à incidence nulle ou à la normale correspond à l'angle de 0°. Le raisonnement appliqué ici pour les propriétés solaires du vitrage s'applique également pour la partie visible du spectre.

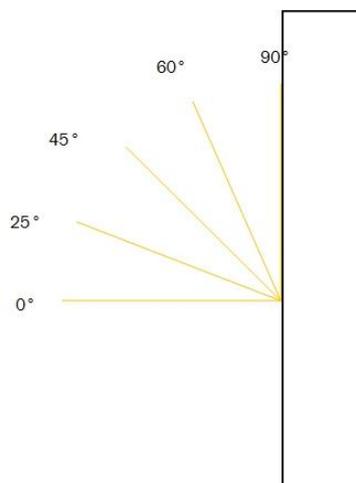


Figure 3-2 : Angles d'incidences du rayonnement sur un vitrage

Bien qu'il soit possible d'effectuer des mesures précises pour obtenir la dépendance angulaire du vitrage, les difficultés et le coût de mise en œuvre reste un problème. Il y a un réel besoin d'une procédure standard simplifiée pour modéliser la variation angulaire des vitrages avec ou sans revêtement.

Les méthodes pour modéliser la variation angulaire des propriétés optiques peuvent être classées, au moins, en 4 catégories (Roos, 1997). Tout d'abord, nous avons la catégorie des « calculs exacts de Fresnel », qui donne les valeurs exactes mais qui demande une connaissance élevée des constantes optiques intrinsèques, de la position et de la nature de chaque couche de matériau, et reste complexe d'utilisation pour un non expert. Dans la catégorie suivante, il y a les « calculs approximatifs de Fresnel », qui approche les constantes optiques des matériaux et donne les valeurs exactes, mais pose les mêmes complexités que la précédente. Ensuite, il y a la catégorie de « calcul équivalent de simple couche », qui assume qu'il existe un seul matériau avec les mêmes propriétés optiques. Cette méthode fonctionne relativement bien pour certains cas mais requiert là aussi des calculs de Fresnel, et pose donc les mêmes problèmes que les méthodes précédentes.

Pour respecter nos objectifs et notre stratégie de modélisation, nous allons nous intéresser à la dernière catégorie, les « modèles empiriques », simple d'utilisation avec peu de paramètres d'entrées et qui donnent des résultats satisfaisants par rapport aux calculs exacts de Fresnel (J Karlsson et al., 2001).

Un modèle empirique fréquemment utilisé est le modèle tangent (Montecchi et Polato, 1998) :

$$\tau_s = \tau_{s0}(1 - \tan^{x_0}(\theta/2)) \quad (3)$$

Où, θ est l'angle d'incidence et x_0 est un exposant variable (dépendant du type de vitrage), τ_{s0} est la transmittance solaire à incidence nulle normale, et doit être connu. Ce dernier a l'avantage d'être simple d'utilisation, s'adapte bien pour les faibles inclinaisons et pour les angles élevés pour quelques vitrages. Néanmoins, le modèle reste très limité pour les doubles ou triples vitrages et les vitrages à revêtement.

Karlsson et Roos (2000) ont proposé un autre modèle polynomial basé sur les travaux de Roos (1997), mais avec 3 termes, qui ajuste mieux la transmittance solaire totale par rapport aux calculs de Fresnel pour un simple, double et triple vitrage ainsi qu'avec revêtement :

$$\tau_{s,dir} = \tau_{s0}(1 - m_0 z^{\alpha'} - n_0 z^{\beta'} - p_0 z^{\gamma'}) \quad (4)$$

Où z représente l'angle réduit, i.e. $z = \frac{\theta}{90}$

Après les calculs d'ajustement à différents types de vitrage, il est possible de fixer les coefficients en fonction du nombre de couche de vitrage et du type de revêtement, on a alors :

$$m_0 = 8, \quad n_0 = 0.25/q, \quad p_0 = (1 - m_0 - n_0) \quad (5)$$

$$\alpha' = 5.2 + 0.7q, \quad \beta' = 2, \quad \gamma' = (5.26 + 0.06q) + (0.73 + 0.04p_c)q \quad (6)$$

Où p_c est le nombre de couches de verre et q représente un paramètre de catégorie entre 1 et 10 dépendant du type de vitrage. La paramètre q est à choisir dans le tableau de l'article de Karlsson et Roos (2000).

Sur la Figure 3-3, on peut observer les courbes de transmittance solaire τ_s , la transmittance à incidence nulle $\tau_{s,0} = 1$, selon l'angle d'incidence (cas extrêmes) pour différents paramètres q et nombres de couches de verre p_c .

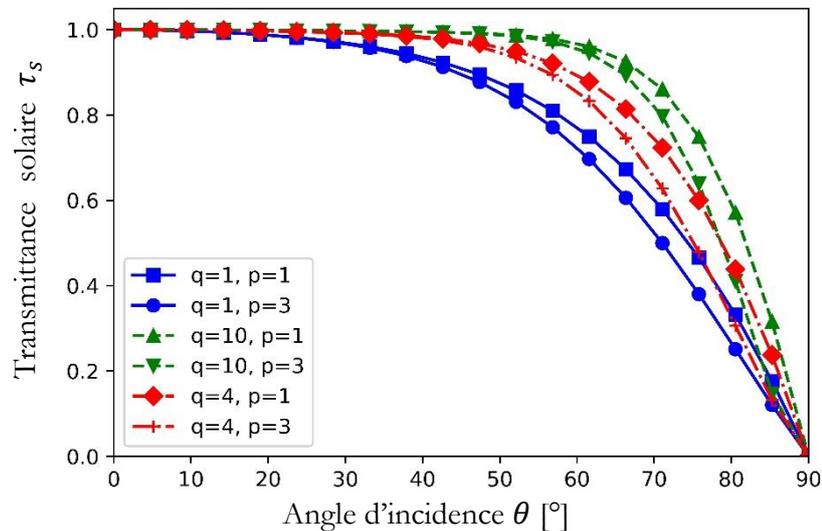


Figure 3-3 : Modèle polynomial de τ_s , pour différents paramètres q , et nombres de couches de verre p (reproduit de J. Karlsson et al., 2001; Karlsson et Roos, 2000)

Dans une autre étude, J Karlsson et al. (2001) ont procédé à l'évaluation des modèles de dépendance angulaire. Le but était de confronter les modèles empiriques (tangent et polynomial par exemple) aux calculs théoriques de Fresnel pour différents types de vitrage et différents types de revêtement. Les résultats montrent que le modèle polynomial possède les déviations les plus petites par rapport aux calculs théoriques, et que son erreur moyenne sur l'ensemble était toujours en dessous de 1%. Ce modèle est donc fiable si on est en mesure de déterminer soit par la mesure soit par le calcul la transmittance à incidence nulle, ainsi que le paramètre de catégorie q . C'est ce modèle qui sera utilisé lors des simulations.

On peut retrouver les différents paramètres de catégorie q , pour des vitrages avec ou sans revêtement couramment rencontrés dans la littérature dans J Karlsson et al. (2001), et dans Karlsson et Roos (2000)

Partant de la connaissance des propriétés thermiques des vitrages et de leur comportement face au flux solaire incident, il est alors possible d'effectuer le bilan énergétique pour calculer les flux solaires transmis, réfléchis et absorbés.

La prise en compte de l'absorption du rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde (CLO) à travers le vitrage peut se faire de deux façons (Caccavelli, 1988). La première méthode prend en compte l'absorption du rayonnement CLO incident exclusivement en surface du vitrage. Le rayonnement CLO sera donc considéré sur le nœud de surface extérieure de la paroi vitrée pour le coupler au problème conductif. On suppose ici que l'absorptance se comporte de manière similaire face au rayonnement direct et diffus.

La densité de flux solaire absorbé s'écrit alors :

$$\varphi_{CLO,a} = \alpha_s(I_{dir,inc} + I_{dif,hor}) \quad (7)$$

Quant au deuxième, le modèle suppose une absorption du rayonnement solaire dans la masse du vitrage. La densité de flux solaire absorbé s'écrit (Alvarez et al., 1998):

$$\varphi_{CLO,a} = (1 - \rho_s) I_{inc} \cdot e^{-kx} \quad (8)$$

Pour mettre en œuvre ce type de modélisation, il faut avoir une bonne connaissance des propriétés optiques du vitrage notamment le coefficient d'extinction, k , ce qui n'est pas toujours le cas. De plus, il existe très peu de différences entre les deux méthodes : écart maximal 0.25°C (Caccavelli, 1988).

Nous avons donc décidé de garder le modèle d'absorption solaire sur la couche de surface extérieure (Equation 7) pour faciliter l'implémentation du modèle dans les codes existants en différences finies, qui est similaire aux parois opaques et qui correspond à la stratégie de modélisation mise en place.

Contrairement à une paroi opaque, le vitrage a la particularité d'être semi transparent au rayonnement solaire. Cela implique donc une transmission de l'énergie solaire à l'intérieur de la pièce. On introduit donc pour effectuer le bilan le facteur de transmission totale qui est nommé ici la transmittance solaire. Comme on distingue deux types de rayonnement solaire, direct et diffus, il y aura aussi deux transmittances pour le calcul de la densité de flux transmise.

La densité de flux transmise à travers le vitrage se formule donc de la manière suivante :

$$\varphi_{CLO,tr} = \tau_{s,dir} \cdot I_{dir,inc} + \tau_{s,diff} \cdot I_{dif,hor} \quad (9)$$

Pour la transmittance directe $\tau_{s,dir}$, il faut utiliser les équations de dépendance angulaire vues au-dessus et calculer selon l'angle d'incidence du soleil à partir de la transmittance à incidence nulle, τ_{s0} .

Pour la transmittance diffuse ou hémisphérique, on utilise aussi les mêmes équations mais il faudra intégrer ces dernières sur l'ensemble des angles d'incidences (180° sur tout le plan du vitrage). En supposant une répartition isotrope du rayonnement diffus, la formule s'écrit donc :

$$\tau_{s,diff} = 2 \int_0^{90} \tau_{s,dir}(\theta) \cdot \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (10)$$

La totalité du rayonnement solaire transmis sera ensuite répartie sur les parois intérieures en fonction de leurs positions, surfaces et leurs réflectances solaires. Connaissant, le flux solaire transmis et absorbé, il est aisé de retrouver le flux solaire réfléchi en appliquant la conservation de l'énergie.

Le vitrage en tant que paroi de l'enveloppe extérieure échange aussi de la chaleur sous forme de rayonnement en grandes longueurs d'ondes.

3.1.2 Transfert par rayonnement de grandes longueurs d'onde (infra-rouge lointain)

Les échanges radiatifs par infra-rouge lointain ou rayonnement en grandes longueurs d'ondes (GLO) se situe entre 3 et 50 μm . Cela concerne les échanges de chaleur entre d'une part, le vitrage et son environnement extérieur direct, et d'autre part le vitrage et son environnement intérieur.

Avec l'extérieur, les échanges radiatifs en grandes longueurs d'ondes se font avec le ciel et avec l'environnement. Pour cela, on introduit une température radiative du ciel, T_{rc} , et de l'environnement, T_{env} . Cette dernière est souvent assimilée à la température d'air extérieur, T_{ae} . Quant à la température de la voûte céleste, T_{rc} , elle est calculée soit par rapport à un modèle de la littérature soit au travers d'un écart avec la température d'air extérieur (Boyer, 1993).

On peut donc écrire le bilan de la densité de flux radiatif GLO extérieur selon la théorie de Stephan-Boltzmann (Miranville, 2002) :

$$\varphi_{GLO,ext} = \varepsilon\sigma \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \cdot (T_{rc}^4 - T_{se}^4) + \varepsilon\sigma \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \cdot (T_{env}^4 - T_{se}^4) \quad (11)$$

Dans l'Equation (11), les facteurs de formes sont fonction de l'angle d'inclinaison, β , entre la paroi et la voûte céleste ou la paroi et le sol. Cette formulation est couramment linéarisée pour rendre possible l'intégration dans le problème mathématique global et répondre aux objectifs de modélisation.

On a donc :

$$\varphi_{GLO,ext} = h_{rc}(T_{rc} - T_{se}) + h_{env}(T_{env} - T_{se}) \quad (12)$$

Où :

$$h_{rc} = \varepsilon\sigma.F_{rc}(T_{rc}^2 + T_{se}^2)(T_{rc} + T_{se}) \quad \text{et} \quad F_{rc} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (13)$$

$$h_{env} = \varepsilon\sigma.F_{env}(T_{env}^2 + T_{se}^2)(T_{env} + T_{se}) \quad \text{et} \quad F_{env} = \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

Pour les échanges radiatifs intérieurs l'approche est différente. En effet, ils sont liés aux énergies émises et réfléchies par les parois internes. Il existe plusieurs méthodes pour les modéliser (Miranville et al., 2008) :

- Méthode simplifiée ;
- Méthode de radiosités ;
- Méthode des lancers de rayons.

Durant cette thèse nous avons fait le choix d'utiliser la méthode simplifiée car elle a l'avantage de s'implémenter facilement même si elle reste plus approximative que les autres. Néanmoins Allard et al. (1985) précise que la méthode simplifiée génère des erreurs de quelques dixièmes de degrés par rapport à celle issue de la méthode exacte. Cela reste acceptable au regard de nos exigences de simulations et de la précision attendue du code de simulation énergétique du bâtiment (de l'ordre de 0.5 à 1°C).

La méthode simplifiée repose sur la formulation d'une température radiante moyenne, T_{rm} , à l'équilibre par rapport aux autres parois et d'une approximation sphérique des facteurs de forme. La température radiante moyenne est calculée selon la moyenne pondérée de la température des parois intérieures de la zone.

$$T_{rm} = \frac{\sum_{p=1}^n S_p \cdot T_{si,p}}{\sum_{p=1}^n S_p} \quad (14)$$

On pose $\sum_{p=1}^n S_p = S_{tot}$, on a donc :

$$T_{rm} = \frac{\sum_{p=1}^n S_p \cdot T_{si,p}}{S_{tot}} \quad (15)$$

Finalement, on écrit la densité de flux radiatif GLO intérieur pour chaque paroi, p :

$$\varphi_{GLO,int} = h_{ri}(T_{rm} - T_{si,p}) \quad (16)$$

Avec :

$$h_{ri} = \varepsilon\sigma F_p (T_{rm}^2 + T_{si,p}^2)(T_{rm} + T_{si,p}) \quad \text{et} \quad F_p = \frac{S_p}{S_{tot}} \quad (17)$$

3.1.3 Transfert par convection

Le phénomène de convection intervient autant à la fois à l'extérieur qu'à l'intérieur et il s'applique à toutes les parois en contact avec l'air (ou fluide). La convection se modélise avec l'équation de Newton et la densité de flux convective s'écrit :

$$\varphi_c = h_c(T_p - T_{air}) \quad (18)$$

Le coefficient d'échange convectif, h_c , se calcule différemment selon que la paroi soit en contact avec l'air ambiant intérieur ou extérieur.

Notamment, pour le calcul du coefficient d'échange convectif extérieur, h_{ce} , on trouve dans la littérature, des modèles fonction de la vitesse de vent, v_f . La relation la plus souvent utilisée est celle de (McAdams, 1954):

$$h_{ce} = 5.678 \left[m_1 + n_1 \left(\frac{v_f}{0.3048} \right)^{p_1} \right] \quad (19)$$

Ce modèle est valable si la mesure de la vitesse du vent est effectuée proche du bâtiment mais éloignée de tout obstacle. Ici, les coefficients m_1 , n_1 et p_1 sont liés à la rugosité de la paroi. On retrouve leur valeur dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Coefficients de corrélation de (McAdams, 1954) en fonction du type de surface

Rugosité	$v_f < 4.88 \text{ m.s}^{-1}$			$4.88 \leq v_f < 30.48 \text{ m.s}^{-1}$		
	m_1	n_1	p_1	m_1	n_1	p_1
Surface lisse	0.99	0.21	1.00	0.00	0.50	0.78
Surface rugueuse	1.09	0.23	1.00	0.00	0.53	0.78

De plus, dans la littérature, il existe différents types de corrélation similaire et les résultats présentent des écarts importants. Selon Rodler (2014), il y a un facteur 4 entre les valeurs les plus petites de la corrélation de Jayamaha et al. (1996) et les plus élevées par la corrélation de Sturrock (1971), comme on peut l'observer sur la Figure 3-4.

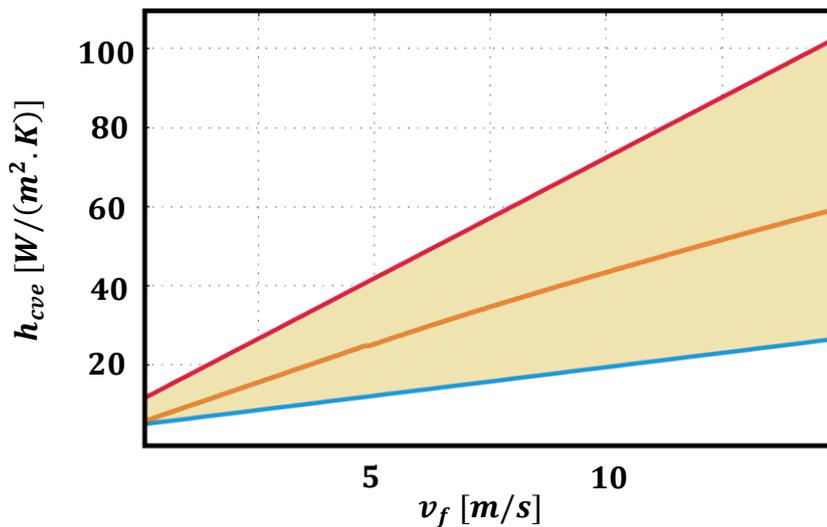


Figure 3-4 : Ordre de grandeur des coefficients convectifs extérieurs calculés par les corrélations. En rouge la corrélation de (Sturrock, 1971); En bleu, la corrélation de (Jayamaha et al., 1996); En orange, la corrélation de (McAdams, 1954) (Rodler, 2014).

En 2002, un modèle empirique du calcul du coefficient d'échange convectif extérieur, nommé « modèle IUT », a été mis spécialement en place dans le cadre des expérimentations menées sur le site expérimental à l'IUT de Saint-Pierre (Miranville, 2002), comme décrit dans le chapitre 2. Ce modèle empirique est issu des données de mesures du site et il est sous la forme : $h_{cve} = m \cdot v_f + n$, où a et b sont des constantes. Ce modèle linéaire sera donc fonction de la vitesse du vent extérieur et sera ajusté par les coefficients m et n par rapport aux données mesurées lors des séquences expérimentales. Néanmoins, tous les modèles présentés seront implémentés dans PITAYA et pourront être choisis en fonction des cas d'études et des besoins de l'utilisateur.

Les échanges convectifs extérieurs sont principalement forcés (par le vent) alors qu'à l'intérieur du bâtiment les échanges sont plutôt naturels. Le problème convectif se ramène aussi à la détermination du coefficient d'échange, h_{ci} , avec plusieurs approches différentes selon le degré de finesse (Miranville, 2002) :

- Coefficient d'échange h_{ci} constant pour toutes les parois ;
- Coefficient d'échange h_{ci} défini selon le type de paroi (Braun et al., 1992) :
 - Plancher, $h_{ci} = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
 - Plafond, $h_{ci} = 6.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
 - Parois verticales, $h_{ci} = 4.09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$;
- Coefficient d'échange h_{cvi} , dépendant linéairement de l'écart de température paroi/air :
 - $h_{ci} = m \cdot (\Delta T) + n$
- Coefficient d'échange h_{cvi} , dépendant non linéairement de l'écart de température paroi/air :
 - $h_{ci} = m \cdot (\Delta T)^p + n$
- Coefficient d'échange h_{ci} , en fonction des corrélations sans dimensions du type :

Niveau de finesse

$$\circ \quad Nu = f(Gr, Pr) = f(Ra)$$

Ici, m , n ou p sont des coefficients constants à déterminer.

Parmi les corrélations non linéaires de la littérature on peut trouver celle de Churchill et Usagi (1974). Ils ont fourni le coefficient d'échange valide pour un régime laminaire et turbulent en convection naturelle :

$$h_{ci} = \left[\left(\frac{0.0175|\Delta T|}{D} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(1.6952|\Delta T|^{\frac{1}{3}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (20)$$

Sur le même procédé, Alamdari et Hammond (1983) ont développé une corrélation valable pour les parois verticales et pour le sol en convection naturelle :

$$h_{cvi} = \left[\left(m_2 \left(\frac{|\Delta T|}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \right)^6 + \left(n_2 \left(|\Delta T|^{\frac{1}{3}} \right) \right)^6 \right]^{\frac{1}{6}} \quad (21)$$

Les coefficients m et n sont définis dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2 : Coefficients de la corrélation d'Alamdari et Hammond (1983)

	m_2	n_2
Surface verticale	1.5	1.23
Surface horizontale	1.4	1.63

Les auteurs ont proposé la corrélation suivante pour le plafond :

$$h_{cvi} = 0.6 \left(\frac{|\Delta T|}{D^2} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (22)$$

Concernant, les modèles intérieurs, toutes les équations présentées seront implémentées dans PITAYA puis testées lors de la phase de validation pour trouver la meilleure corrélation qui s'applique au cas étudié.

3.1.4 Transfert par conduction

La conduction dans les vitrages est traitée comme un problème classique de parois opaques en physique du bâtiment. En régime dynamique on écrit donc l'équation de la chaleur (mono dimensionnelle et sans terme source) pour un milieu isotrope à caractéristiques thermo-physiques constantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \\ \text{où } a = \frac{\lambda}{\mu \cdot c} \end{array} \right. \quad (23)$$

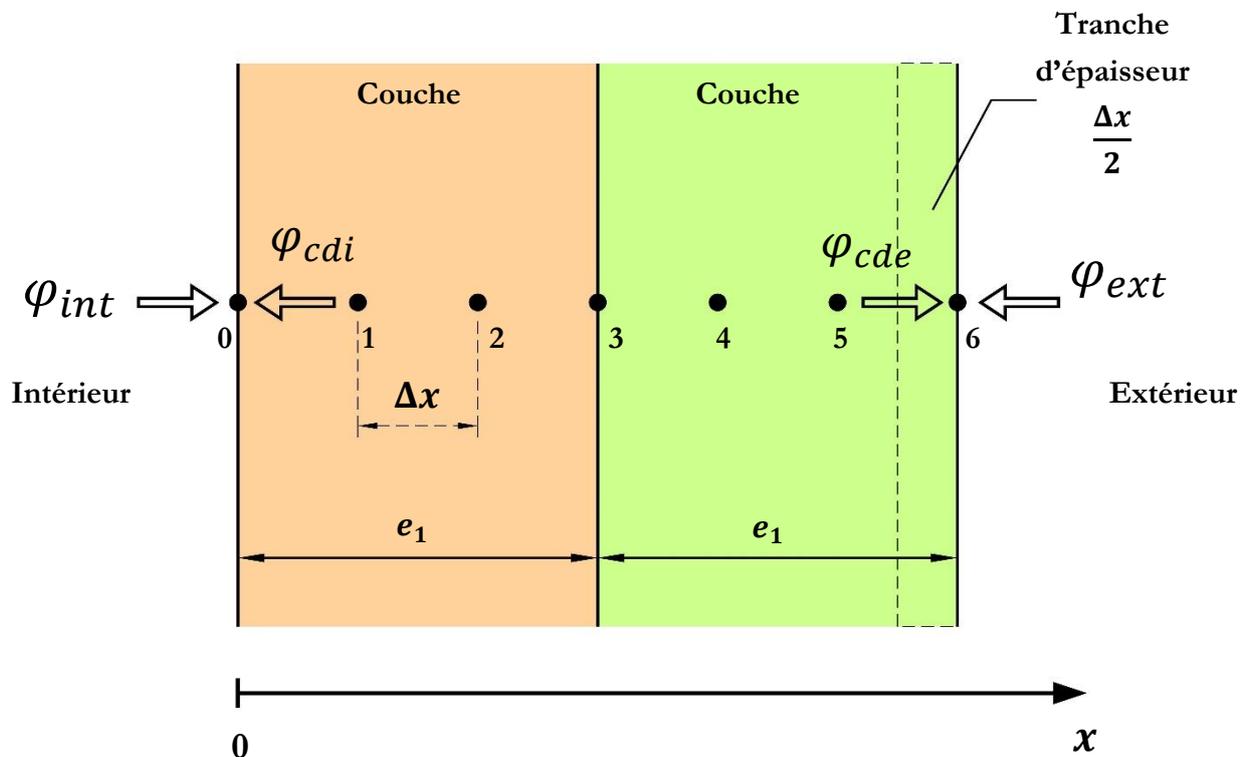


Figure 3-5 : Exemple de discrétisation spatiale d'une paroi multicouches (Miranville, 2002)

Pour répondre à la stratégie de modélisation mise en place, on procède donc à une discrétisation spatio-temporelle de l'équation de la chaleur selon la méthode des différences finies appliquée aux différentes couches du vitrage (Figure 3-5). Pour aller plus loin, la méthode est détaillée dans Miranville, (2002). Les densités de flux intérieur, φ_{int} , et extérieur, φ_{ext} , sont les sommes des sollicitations radiatives (CLO et GLO) et convectives décrites dans les paragraphes ci-dessus.

Pour résoudre l'équation de la chaleur, il est nécessaire de fixer les conditions initiales et les conditions aux limites. En thermique du bâtiment, les conditions aux limites peuvent être de type

Dirichlet, Neumann et dans la plupart des cas de type Fourier. Elles sont données grâce au couplage du problème conductif avec les problèmes radiatifs et convectifs (voir dans les paragraphes 3.1.1 3.1.2 et 3.1.3).

Concernant les nœuds internes, en prenant comme hypothèse un schéma implicite en différences finies, une discrétisation temporelle en avant et une discrétisation dans l'espace centré, on peut écrire (pour les nœuds n°1 ou 2 sur la Figure 3-5 par exemple) l'équation de la chaleur discrétisée :

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = a \frac{T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} \quad (24)$$

En posant $\gamma = a \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$, on a alors :

$$T_i^n = -\gamma T_{i-1}^{n+1} + (1 + 2\gamma)T_i^{n+1} - \gamma T_{i+1}^{n+1} \quad (25)$$

Ensuite, pour les nœuds de surface (comme par exemple les nœuds n°0 ou 6 sur la Figure 3-5), un bilan énergétique est établi sur la tranche d'épaisseur $\Delta x/2$. Selon Incropera et al. (1985), le bilan énergétique doit tenir compte des flux entrant dans le nœud. Pour la surface extérieure, le bilan s'exprime :

$$\varphi_{cde} + \varphi_{ce} + \varphi_{GLOe} + \varphi_{CLOe} = \mu_{ext} \cdot c_{ext} \left(\frac{\Delta x}{2} \right) \left(\frac{T_{se}^{n+1} - T_{se}^n}{\Delta t} \right) \quad (26)$$

Similairement, pour la surface intérieure, le bilan s'exprime :

$$\varphi_{cdi} + \varphi_{ci} + \varphi_{GLOi} + \varphi_{CLOi} = \mu_{int} \cdot c_{int} \left(\frac{\Delta x}{2} \right) \left(\frac{T_{si}^{n+1} - T_{si}^n}{\Delta t} \right) \quad (27)$$

Pour finir, concernant les nœuds de liaison (comme par exemple nœud N°3 sur la Figure 3-5), à l'interface entre deux couches consécutives, c et $c + 1$, la résolution du problème est basée sur la conservation du flux conductifs entre les deux couches. On écrit donc le flux de chaleur :

$$\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial x} = \lambda_{c+1} \frac{\partial T_{c+1}}{\partial x} \quad (28)$$

Ici l'indice, c , est relatif au numéro de couche.

3.1.5 Bilan enthalpique du volume d'air intérieur

Pour terminer la modélisation du problème thermique, on effectue un bilan thermo-convectif de l'air. On peut ainsi calculer la température sèche du nœud d'air. Dans notre cas, on considère une zone sans débit d'air, sans climatisation et sans charges internes.

L'équation bilan s'écrit donc de la manière suivante :

$$\mu_{ai} \cdot c_{ai} \cdot V_{ai} \frac{dT_{ai}}{dt} = \sum h_{ci} \cdot S_p (T_{si,p} - T_{ai}) \quad (29)$$

Cette formulation suppose que la température de l'air est considérée homogène dans tout le local. En reprenant les mêmes notations et discrétisant selon la méthode des différences finies, on a :

$$T_{ai}^n = \left[1 + \frac{h_{ci} \cdot \Delta t}{\mu_{ai} \cdot c_{ai} \cdot V_{ai}} \sum S_p \right] T_{ai}^{n+1} - \frac{h_{ci} \cdot \Delta t}{\mu_{ai} \cdot c_{ai} \cdot V_{ai}} \sum h_{ci} \cdot S_p \cdot T_{si,p}^{n+1} \quad (30)$$

Finalement, le bilan matriciel du système thermique peut donc s'écrire :

$$[T]^n = [A] \cdot [T]^{n+1} + [B] \quad (31)$$

Avec $[A]$ comme matrice d'état du système thermique et $[B]$ comme matrice des sollicitations extérieures. Pour résoudre ce système linéaire et calculer les nœuds de température au pas de temps suivant, on inverse la matrice $[A]$, comme suit :

$$[T]^{n+1} = [A]^{-1} \cdot ([T]^n - [B]) \quad (32)$$

Avant d'aller plus loin dans la modélisation, il est nécessaire d'effectuer des tests de cohérences avec les modèles choisis. Nous allons donc, à ce stade, comparer les résultats issus de PITAYA au logiciel CODYRUN (Boyer et al., 2014). Le logiciel CODYRUN étant validé numériquement et expérimentalement sur la plage d'études visée pour les tests de cohérence, ces derniers permettront donc d'identifier rapidement d'éventuelles faiblesses de PITAYA. Concernant les tests de cohérences suivants ils se font sur la température sèche de l'air intérieur et le résidu est la différence de température. Les mêmes caractéristiques géométriques et propriétés thermiques ont été utilisées dans toutes les simulations. Le détail des hypothèses ainsi que des résultats supplémentaires seront mis à disposition dans l'Annexe A.

Nous allons commencer par des tests en régime permanent avec des conditions météorologiques constantes puis finalement un test en régime transitoire.

Scénario 1 :

Les conditions extérieures pour le scénario 1 sont Tableau 3-3.

Tableau 3-3 : Conditions extérieures pour le test de cohérence du scénario 1

Température (°C)	Humidité relative (%)	Rayonnement solaire (W/m ²)
25	75	0

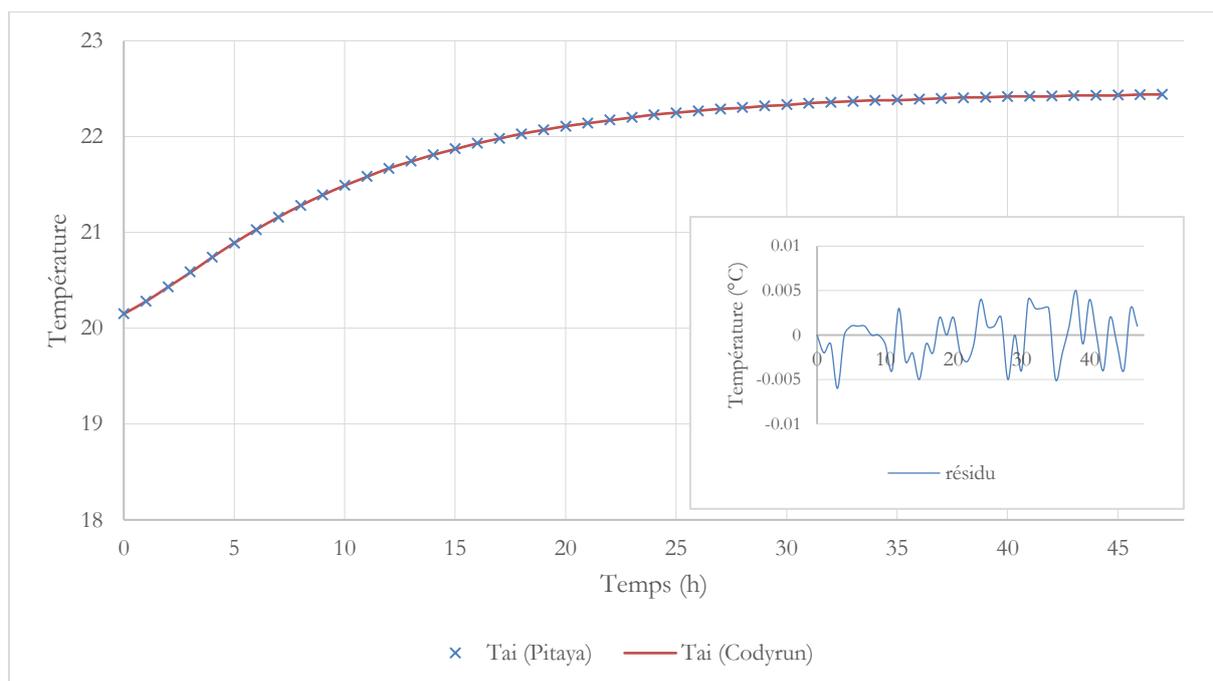


Figure 3-6 : Evolution de la température d'air et du résidu pour le scénario 1 entre PITAYA et CODYRUN

On constate, sur la Figure 3-6, une évolution de la température d'air intérieur similaire pour les deux codes, de plus la courbe du résidu nous montre que l'erreur se situe à ± 0.006 °C.

Scénario 2 :

Les conditions extérieures pour le scénario 2 sont dans le Tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Conditions extérieures pour le test de cohérence du scénario 2

Température (°C)	Humidité relative (%)	Rayonnement solaire Direct (W/m ²)
25	75	Entre 6h et 18h : 500 Entre 18h et 6h : 0

Il est à noter que pour le scénario 2, la position du soleil a été considérée constante avec une hauteur solaire de 90° (zénith) et un azimut de 0° (Nord).

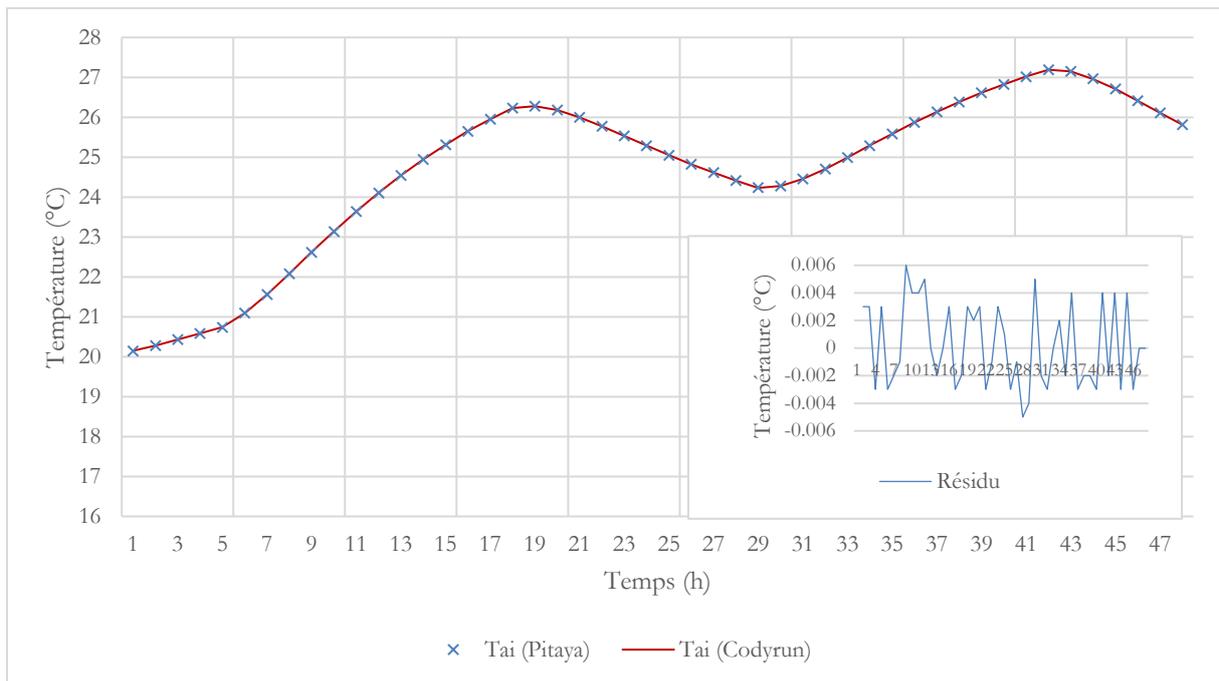


Figure 3-7 : Evolution de la température d'air et du résidu pour le scénario 2 entre PITAYA et CODYRUN

Sur la Figure 3-7, on observe une évolution de la température d'air intérieure similaire pour les deux codes, de plus la courbe du résidu nous montre que l'erreur se situe à ± 0.006 °C.

Scénario 3 :

Ce scénario est un test en régime transitoire sur 3 jours avec les données météo du fichier **Mars2.mto**. Le détail des données météorologiques pour ce test est à retrouver dans l'Annexe B.

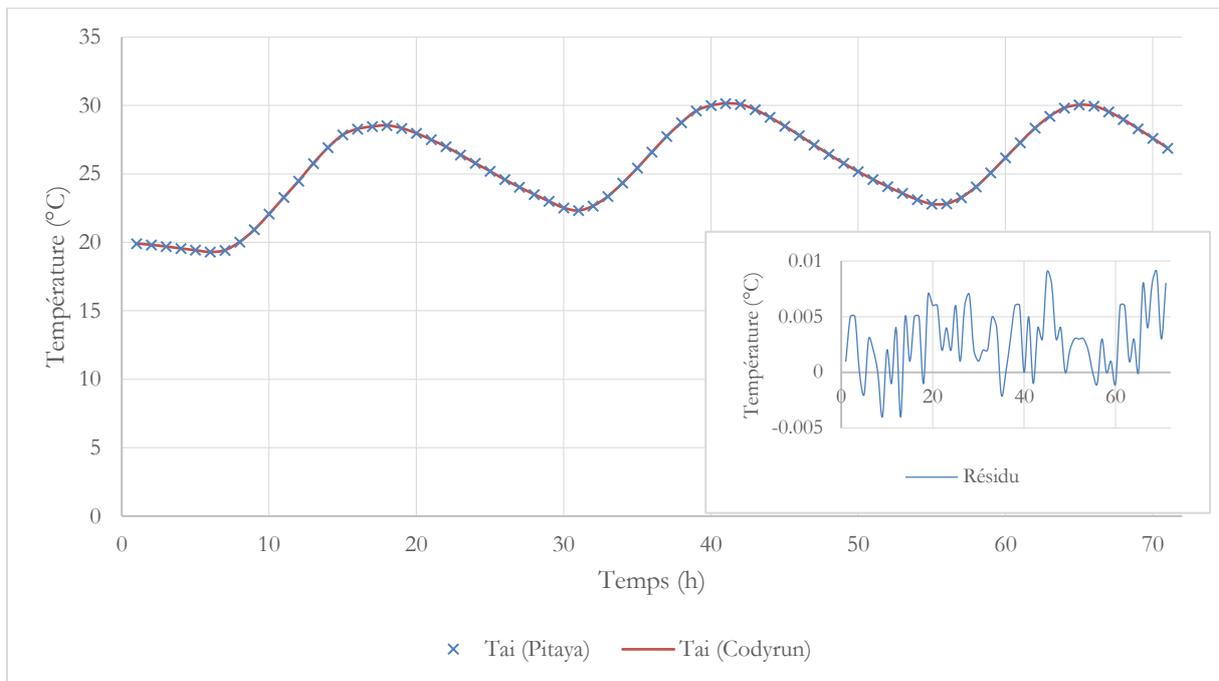


Figure 3-8 : Evolution de la température d'air et du résidu pour le scénario 3 entre PITAYA et CODYRUN pour le 8, 9 et 10 Mars

Sur la Figure 3-8, on remarque une évolution de la température d'air intérieur similaire pour les deux codes, de plus la courbe du résidu nous montre que l'erreur se situe entre +0.01 et -0.005 °C.

Au final, les résultats comparés des trois scénarios entre PITAYA et CODYRUN sont cohérents en ce qui concerne la prédiction de la température d'air intérieur du bâtiment. On peut donc passer à l'étape suivante pour l'implémentation des nouveaux modèles concernant le comportement dynamique du VTC dans PITAYA.

3.1.6 Modélisation de l'éclairage naturel

Le phénomène d'éclairage naturel correspond au rayonnement visible qui se situe entre 0.4 et 0.8 μm de longueurs d'ondes. Sur terre, la source de lumière naturelle visible est due au soleil. Cela veut donc dire que l'on peut séparer ce rayonnement en éclairage direct et en éclairage diffus. Cette distinction impliquera donc deux modélisations différentes qui seront regroupées sous une formulation arithmétique globale.

La modélisation des transferts lumineux à travers un matériau semi-transparent, comme le vitrage, et de leur répartition à l'intérieur de la pièce, peut s'avérer une tâche complexe car plusieurs approches sont possibles. On peut recenser 3 catégories de méthode : la méthode expérimentale, les modèles numériques et les modèles mathématiques (Fakra et al., 2011). Chacune des méthodes présentent des avantages et des inconvénients (Wong, 2017) comme il est possible de le voir dans le Tableau 3-5.

Tableau 3-5 : Avantages et inconvénients des différentes méthodes pour la prédiction en éclairage naturel (Fakra et al., 2011; Wong, 2017)

Méthode	Avantages	Inconvénients
Expérimentale	<ul style="list-style-type: none"> – Performance sous conditions de ciel réel ; – Représentation exacte de la conception voulue – Adaptée au système de fenêtre complexe 	<ul style="list-style-type: none"> – Temps de mise en œuvre et coût élevé ; – Dépendance forte et limitée aux contraintes climatiques du lieu – Surestimation de l'éclairage et source d'erreur pour les maquettes réduites
Numérique	<ul style="list-style-type: none"> – Résultats précis – Capacité à simuler des modèles complexes – Simulation dynamique annuelle 	<ul style="list-style-type: none"> – Temps de calcul élevé – Besoin de validation expérimentale – Connaissances avancées requises
Mathématique	<ul style="list-style-type: none"> – Temps de calcul rapide – Facile à implémenter – Capacité à simuler des modèles semi-détaillés 	<ul style="list-style-type: none"> – Résultats moins précis – Applicable sous certaines conditions – Besoin de validation expérimentale

Bien que les méthodes numériques (lancers de rayons et radiosités) soient plus précises, elles sont aussi plus coûteuses en temps calcul. Nous avons donc voulu nous orienter vers une modélisation mathématique qui permettra à la fois d'avoir des résultats fiables (sous réserve de validation) et de rester sur une échelle de temps de simulation proche d'un code de calcul en thermique du bâtiment (de l'ordre de quelques minutes au maximum). En effet, ici, les besoins de simulation sont pour le comportement thermique et photométrique du VTC, simultanément. Pour la modélisation de l'éclairage naturel, l'orientation s'est donc faite sur les méthodes mathématiques.

Pour commencer, nous allons nous intéresser à une méthode mathématique pour la modélisation de l'éclairage diffus : La méthode des flux séparés (ou Split-flux en anglais) a été proposée par le BRE¹³ en 1987. Cette méthode permet de calculer le facteur de lumière du jour (FLJ), pour un ciel couvert et uniforme, en un point quelconque d'une pièce par des formules mathématiques et des abaques. Cette méthode répond donc bien aux besoins de la stratégie globale de la modélisation.

¹³ English Building Research Establishment

Le FLJ est le rapport entre la quantité d'éclairément en un point sur la quantité d'éclairément disponible à l'extérieur (sans obstruction) comme illustré sur la Figure 3-9. La formule du FLJ s'écrit donc :

$$FLJ = \frac{E_{int}}{E_{ext}} \quad (33)$$

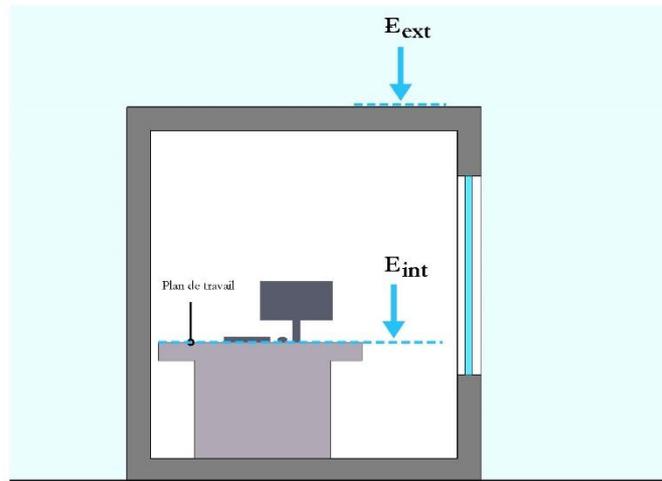


Figure 3-9 : Le facteur de Lumière du Jour (FLJ)

Le FLJ se décompose en trois sources d'éclairément, comme on peut l'observer sur la Figure 3-10 :

- *DC* : la composante directe, source de lumière provenant directement du ciel ;
- *DE* : la composante réfléchie extérieure, source de lumière réfléchie par les obstacles extérieurs ;
- *DI* : la composante réfléchie intérieure, source de lumière réfléchie par les parois intérieures.

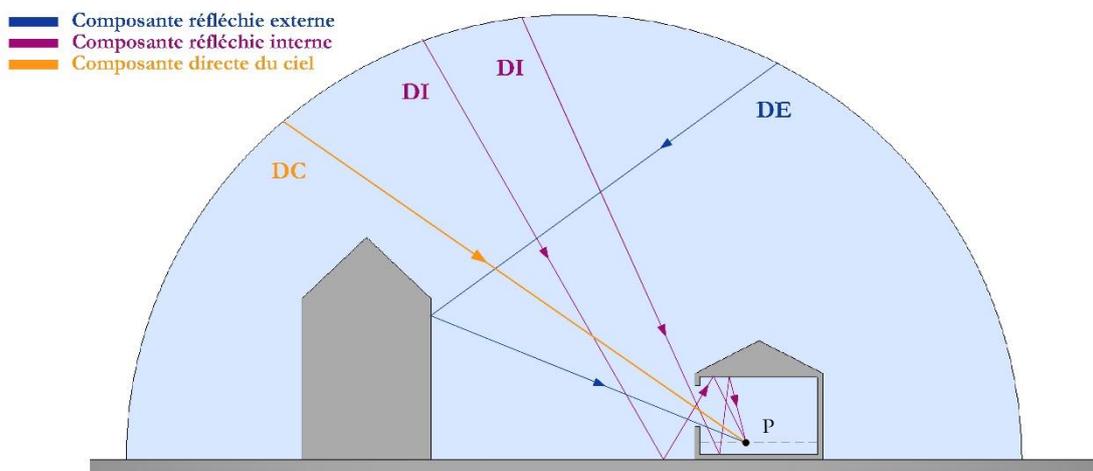


Figure 3-10 : Les trois composantes du FLJ

Le FLJ est donc la somme des trois composantes et s'écrit :

$$FLJ = DC + DE + DI \quad (34)$$

On commencera par définir la composante directe, DC , du FLJ. Le calcul est fonction de la géométrie de la pièce, de la forme et de la position du vitrage par rapport au point, P , à l'intérieur (Figure 3-11).

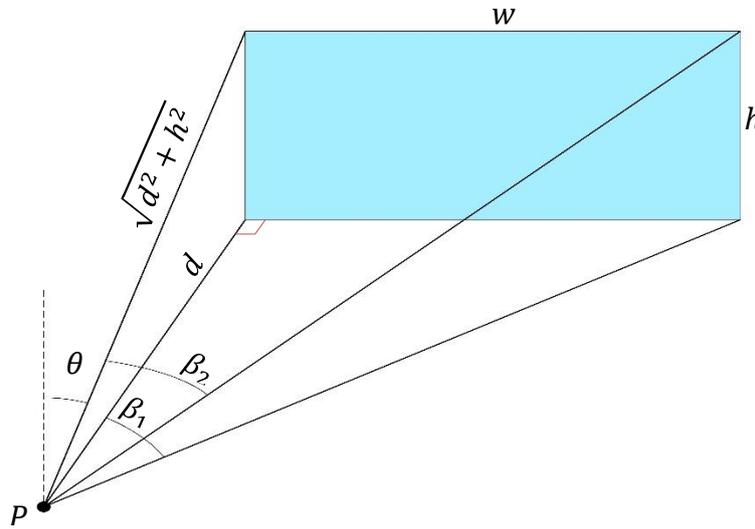


Figure 3-11 : Composante directe provenant d'une ouverture rectangulaire verticale (en bleue) pour un point P dans la pièce

A partir de la définition de l'intensité lumineuse dans l'intervalle fini d'un angle solide, on calcule la composante directe, DC , au point P, à l'intérieur d'une pièce fermée, éclairé par une ouverture rectangulaire verticale, avec la formulation suivante (Hopkinson, 1963):

$$DC = \frac{\int_0^{\beta_1} \left(\int_{\theta(\beta)}^{\pi/2} L(\theta, \beta) (\cos \theta \sin \beta) d\theta \right) d\beta}{L_{zh} \frac{7\pi}{9}} \quad (35)$$

On obtient ensuite :

$$DC = \frac{3}{14\pi} (\beta_2 - \beta_1 \cos \theta) + \frac{2}{7\pi} \arcsin(\sin \theta \sin \beta_2) - \frac{1}{7\pi} (\sin 2\theta) (\sin \beta_1) \quad (36)$$

Où β_2 , β_1 , $\cos \theta$, $\sin \beta_2$, $\sin \beta_1$ et $\sin 2\theta$ peuvent être exprimés en fonction de h , d et w , ce qui donne la formule finale :

$$\begin{aligned}
DC = & \frac{3}{14\pi} \arctan\left(\frac{w}{d}\right) - \frac{3}{14\pi} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{h}{d}\right)^2 + 1}} \arctan\left(\frac{\frac{w}{d}}{\sqrt{\left(\frac{h}{d}\right)^2 + 1}}\right) \\
& + \frac{2}{7\pi} \arcsin\left(\frac{\frac{w}{d} \times \frac{h}{d}}{\sqrt{\left(\frac{w}{d}\right)^2 + 1} \times \sqrt{\left(\frac{h}{d}\right)^2 + 1}}\right) \\
& - \frac{2}{7\pi} \left(\frac{\frac{w}{d} \times \frac{h}{d}}{\left(\left(\frac{h}{d}\right)^2 + 1\right) \sqrt{\left(\frac{h}{d}\right)^2 + \left(\frac{w}{d}\right)^2 + 1}}\right)
\end{aligned} \tag{37}$$

La formule ci-dessus permet de calculer la composante directe pour un point P situé à une distance d inférieure du coin gauche du vitrage. Il est donc possible par addition ou soustraction d'effectuer le calcul pour n'importe quel point de la pièce. Le lecteur peut se référer à (Fakra, 2009) pour aller plus en détail dans la méthode.

Ainsi, à partir de la formulation de la composante directe, DC , il est possible d'en déduire la composante réfléchie externe, DE . Si le passage direct de la lumière à travers le vitrage est limité par une obstruction extérieure, il est nécessaire de calculer la composante réfléchie externe. Cette composante est donc fonction de la composante directe, DC pondérée par le coefficient moyen de réflexion de l'obstruction, ρ_{obs} . On a donc la formule suivante :

$$DE = DC \times \rho_{obs} \tag{38}$$

Finalement, la composante réfléchie interne, DI , sera fonction des propriétés des couleurs des parois internes pondérées par leurs surfaces et des obstructions extérieures. L'équation s'écrit :

$$DI = \eta_{tot} \frac{S_v C \rho_{fw} + 5 \rho_{cw}}{S_{tot} 1 - \rho_{moy}} \tag{39}$$

Où

$$\eta_{tot} = \eta_v \times \eta_{ps} \times \eta_{ca} \times \eta_{ac} \tag{40}$$

Et

$$C = 40 - \frac{\omega}{2} \tag{41}$$

Avec :

- C Coefficient dépendant des obstructions extérieures [-] ;
- ω Hauteur angulaire au-dessus de l'horizon, mesurée au centre du vitrage [°] ;
- ρ_{fw} Facteur de réflexion moyen pondéré du plafond et des surfaces de mur situées en-dessous du centre de l'ouverture (à l'exclusion du mur contenant l'ouverture) [-] ;
- ρ_{cw} Facteur de réflexion moyen pondéré du plafond et des surfaces de mur situées au-dessus du centre de l'ouverture (à l'exclusion du mur contenant l'ouverture) [-] ;
- ρ_{moy} Facteur de réflexion moyen pondéré des surfaces internes des parois (sol, murs et plafond y compris les ouvertures) [-] ;
- S_v Surface du vitrage [m²] ;
- S_{tot} Surface totale des parois intérieures [m²] ;
- η_v Facteur de correction dû à l'éloignement du point par rapport au vitrage [-] ;
- η_{ps} Facteur de correction dû à la poussière [-] ;
- η_{ca} Facteur de correction dû au cadre de la menuiserie [-] ;
- η_{ac} Facteur de correction dû à l'activité [-].

Dans l'équation (40) ci-dessus, on retrouve un facteur de correction, η_v , dû à l'éloignement par rapport au vitrage. Si la distance entre le point et le vitrage est inférieure à 2 fois la hauteur du vitrage le facteur, η_v , est égale à 1, sinon il est fonction du facteur de réflexion moyen, ρ_{moy} , et comme dans le Tableau 3-6.

Facteur de réflexion moyen ρ_{moy}	Facteur de correction η_v
0.3	0.54
0.4	0.67
0.5	0.78
0.6	0.85

Tableau 3-6 : Coefficients correcteurs de la composante réfléchie interne

Pour prédire l'éclairement global en chaque point de la grille du plan utile, le modèle utilisé lors de cette thèse est celui proposé par A. H. Fakra (2009). Ce modèle repose sur la prise en compte d'une part de l'éclairement diffus par la méthode des flux séparés et d'autre part de l'éclairement direct.

De plus, le modèle prend aussi en compte l'éclairement diffus qui sera généré par la tâche solaire à l'intérieur de la pièce.

La pièce sera discrétisée spatialement pour former une grille où les calculs se feront sur chaque nœud. Pour la prise en compte de la tâche solaire, PITAYA a un algorithme de détection d'appartenance à un polygone. PITAYA génère donc un polygone par projection des coordonnées du vitrage par rapport au vecteur directeur de la position du soleil et ensuite compte le nombre de points de la grille appartenant à la tâche solaire. La partie directe dans l'équation ci-dessous est nulle pour les points non concernés par la tâche solaire.

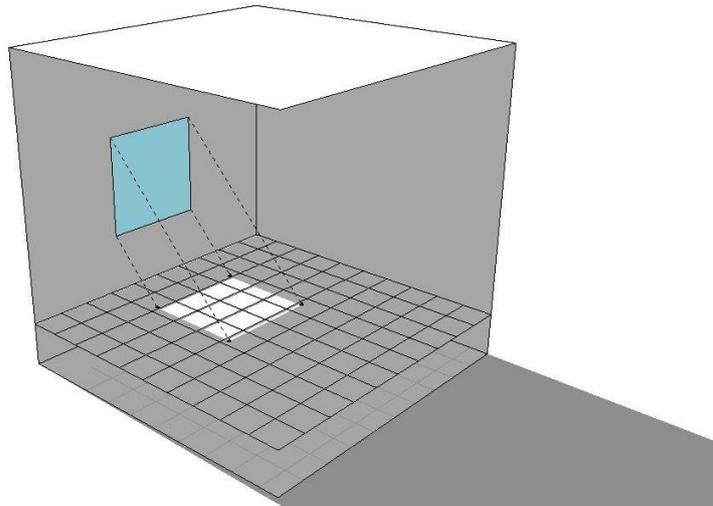


Figure 3-12 : Représentation du maillage horizontal du plan utile avec tâche solaire

On a donc l'équation de l'éclairement global pour un point $P_{(x,y,z)}$ suivante (Fakra, 2009) :

$$E_{global(x,y,z)} = \tau_{vis,dif} \times FLJ_{x,y,z} \times E_{dif} + \tau_{vis,dir} \times E_{dir} + \rho_s \times E_{tr,dir} \times \frac{S_{ts}}{S_{tot}} \quad (42)$$

Avec :

- $\tau_{vis,dif}$ Transmittance visible diffuse du vitrage (hémisphérique) [-] ;
- $\tau_{vis,dir}$ Transmittance visible directe du vitrage [-] ;
- E_{dif} Eclairement extérieur diffus horizontal [lux] ;
- E_{dir} Eclairement extérieur direct horizontal [lux] ;
- $E_{tr,dir}$ Eclairement direct transmis [lux] ;
- S_{ts} Surface de la tâche solaire [m²]

Pour le calcul de $\tau_{vis,dif}$ et de $\tau_{vis,dir}$, il faut se référer à la 3.1.1 « Transfert par rayonnement de courtes longueurs d'onde (solaire) ».

Pour conclure la première partie et après la revue de bibliographie ci-dessus nous avons retenu certains modèles qui nous semblent plus adaptés au travail de thèse. Nous avons vu l'ensemble des équations qui nous permettent de représenter les phénomènes photométriques et thermiques pour une pièce (monozone). Nous sommes capables d'évaluer l'ensemble des flux qui s'applique à notre cas d'étude, notamment pour les parois vitrées. La résolution de ces équations nous permettra de calculer la répartition de l'éclairement lumineux et de connaître la température des surfaces du VTC et des parois ainsi que la température d'air sèche.

3.2 MODELISATION DE LA VARIATION DES PROPRIETES THERMO-OPTIQUES

Le principe d'un vitrage thermochrome (VTC) est que ses propriétés thermo-optiques évoluent en fonction de sa température. Cela veut dire qu'il est nécessaire d'avoir un modèle de variation de sa transmittance, son absorptance et sa réflectance en fonction de la température. Cela peut représenter aussi bien les propriétés thermique (solaire) ou visible. Pour rappel, dans le cas d'un VTC absorbant, la transmittance diminue et l'absorptance augmente quand la température augmente, et inversement. La réflectance quant à elle est plus ou moins constante sur l'ensemble de la variation. Dans le cas d'un VTC réfléchif, c'est la réflectance qui augmente quand la température augmente et l'absorptance reste constante. La transmittance diminue toujours quand la température augmente.

Dans la suite de ce chapitre, la variation de la transmittance en fonction de la température sera appelée la « fonction de contrôle ». Dans les codes de calculs existants (voir *Chapitre 1*), on peut trouver plusieurs façons de modéliser la fonction de contrôle. Dans la majorité des logiciels, il est utilisé la fonction « escalier » : c'est une fonction constante par morceaux et discontinue (DOE, 2010). La forme de la courbe ressemble à un escalier d'où son appellation (Figure 3-13). Cette méthode reste simple d'implémentation et de compréhension pour l'utilisateur des logiciels de simulation.

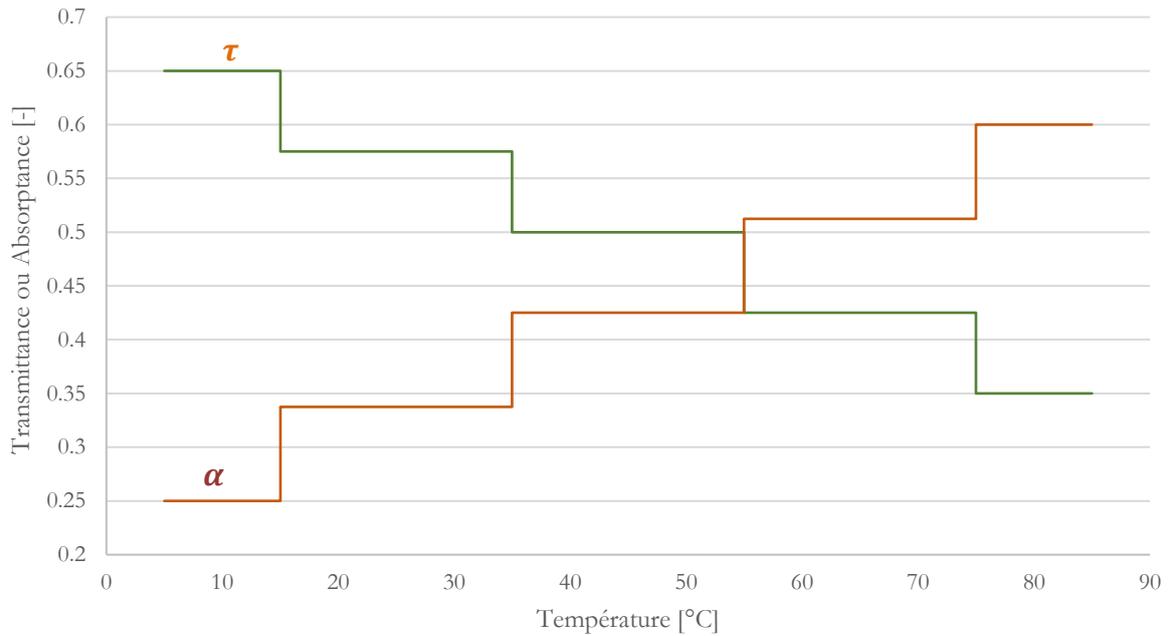


Figure 3-13 : Exemple de représentation de la fonction contrôle avec la méthode « en escalier »

Dans quelques cas, la méthode linéaire est utilisée dans les logiciels (Loonen et al., 2013). Cette méthode est continue sur l'ensemble de la variation mais présente des paliers pour les valeurs extrêmes (Figure 3-14).

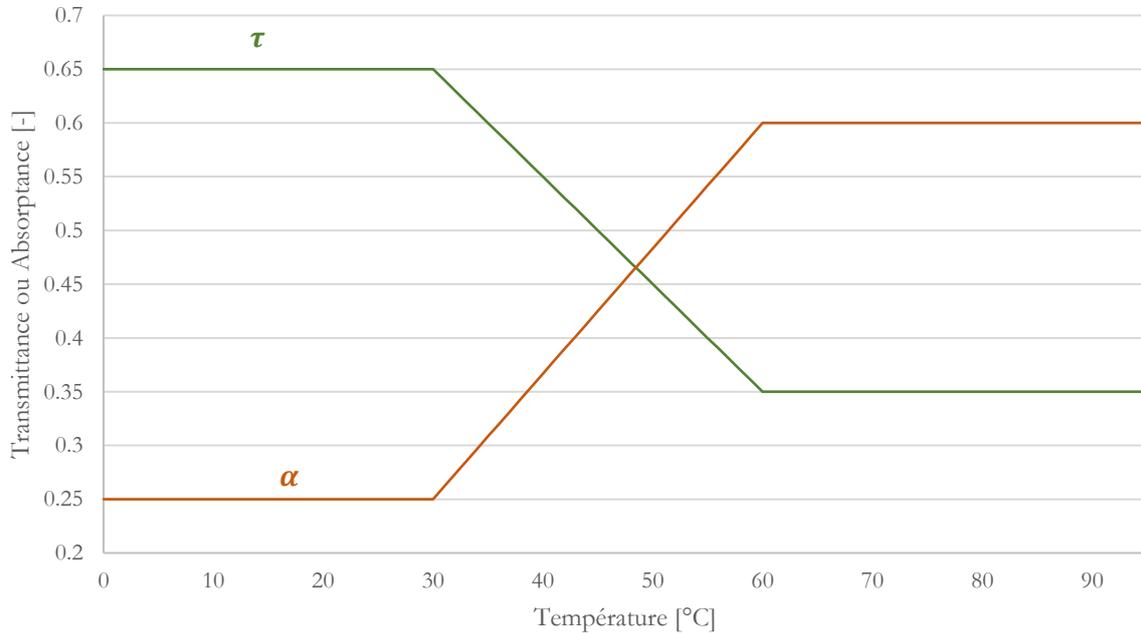


Figure 3-14 : Exemple de la fonction de contrôle avec la méthode linéaire

Une dernière méthode est la « sigmoïde », qui est continue sur l'ensemble de la variation, et la courbe est en forme de « S ». Cette dernière méthode n'a jamais été proposée dans aucun code de calcul ou logiciel existant, selon notre revue bibliographique. On l'appelle aussi la fonction logistique.

Dans la littérature, en chimie des matériaux, les chercheurs qui mesurent la transmittance (ou absorptance et réflectance) en fonction de la température exploitent des courbes qui sont de type « sigmoïde » (Dietrich et al., 2015; Manning et al., 2004; Mlyuka et al., 2009)

Cette fonction a l'avantage d'approcher le comportement réel de la variation des propriétés d'un VTC en fonction de la température, et comparée aux autres méthodes (ci-dessus), elle offre une plus grande possibilité de solutions sur l'ensemble de définition.

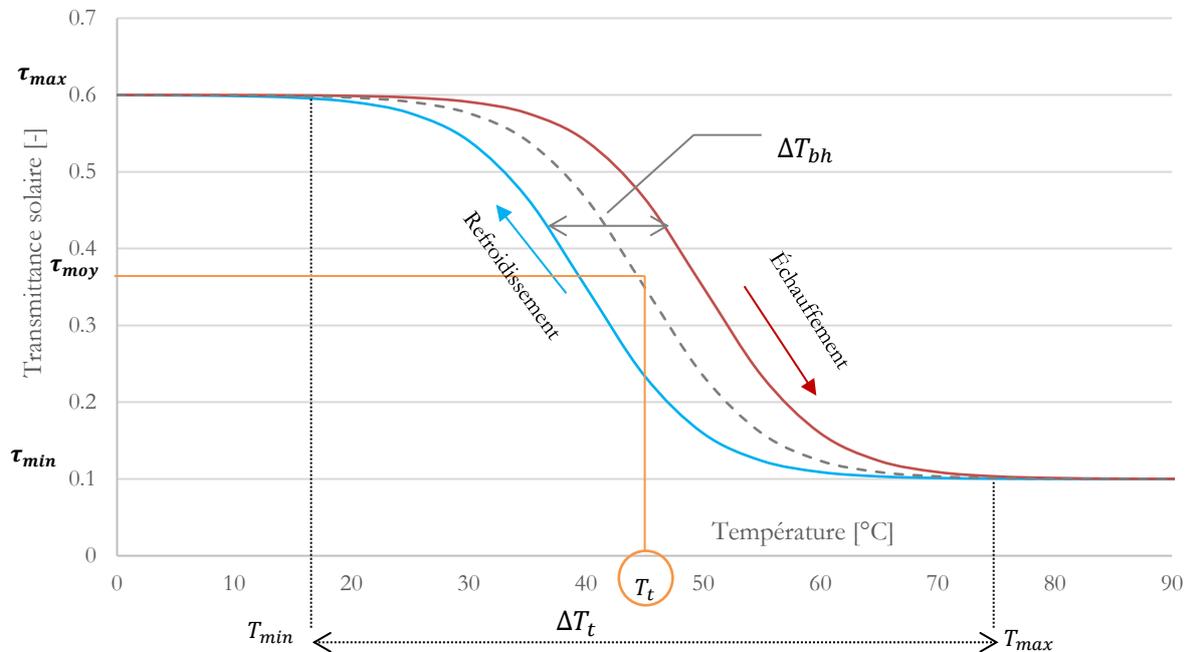


Figure 3-15 : Exemple de la courbe 'sigmoïde' de la transmittance solaire avec cycle d'hystérésis du VTC

Selon notre recherche bibliographique sur la modélisation des VTC, nous n'avons trouvé aucune proposition de formulation pour définir cette fonction de contrôle paramétrée avec les propriétés du VTC. On trouve donc ci-dessous, la fonction de contrôle de type « sigmoïde », avec les paramètres du VTC, en fonction de la température.

$$\tau(T) = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{1 + e^{c[T-(T_t+\delta)]}} + \tau_{min} \quad (43)$$

Avec :

$$\delta = \begin{cases} -\frac{\Delta T_{bh}}{2}, & \text{si } T_t^{n+1} < T_t^n \\ \frac{\Delta T_{bh}}{2}, & \text{si } T_t^n < T_t^{n+1} \end{cases}$$

Le phénomène d'hystérésis a été discuté lors du *Chapitre 1*. En effet, on a pu remarquer qu'il existe un cycle de fonctionnement différent selon que le VTC s'échauffe ou qu'il se refroidisse. On va donc parler de phase d'échauffement et de phase de refroidissement. Dans la littérature la prise en compte et l'étude de l'hystérésis est encore à un stade peu développé, mais a montré des résultats satisfaisants et des pistes prometteuses pour l'amélioration des modèles du VTC. Lors de cette thèse, le phénomène d'hystérésis a été pris en compte dans le modèle. Le terme, δ , a été ajouté pour prendre en compte le delta de température entre le cycle d'échauffement et le cycle de refroidissement (voir Figure 3-15). Néanmoins, ce phénomène ne fera pas directement partie de l'étude et fera l'objet de recherche ultérieure à ces travaux de thèse. La raison est que nous ne possédons aucune connaissance sur les paramètres d'hystérésis. C'est pour cela que nous utiliserons les données de la courbe du milieu données par le fabricant (courbe en pointillée sur la Figure 3-15).

Sur la Figure 3-15, la courbe de cette fonction a comme particularité de posséder deux extremums aux droites d'équation : $\tau = \tau_{max}$ et $\tau = \tau_{min}$. Elle possède aussi un point d'inflexion de coordonnées $\left(\tau_{moy}, T_t \right)$; τ_{moy} représente la transmittance moyenne ; T_t représente la température de transition du VTC. Le facteur c , quant à lui est un coefficient de pente de la courbe. Cette fonction est une combinaison entre une fonction quotient, exponentielle et affine. On l'appelle aussi fonction logistique basée sur le modèle de Verhulst (Peleg et al., 2007; Verhulst, 1845).

Pour répondre aux objectifs de modélisation, nous avons choisi d'implémenter l'équation (43) ci-dessus. Cette courbe non linéaire pose des problèmes de modélisation pour certains schémas numériques, notamment les différences finies implicites, qui sont utilisées ici. En effet, comme il est possible de l'observer les propriétés du vitrage sont fortement liés à la température (principe du VTC), ce qui pose problème dans la formation matricielle du système thermique mis en place, lors de l'inversement de la matrice d'état du système citée précédemment.

Après analyse des différentes méthodes possibles, le choix s'est donc porté sur une méthode dite « décalée » entre les propriétés thermo-optiques du VTC et sa température (Miranville, 2002), comme on peut le voir sur le synoptique de la Figure 3-16. De plus, pour diminuer l'effet du décalage sur les résultats, on choisira d'effectuer les simulations avec un petit pas de temps de l'ordre de la minute, c'est-à-dire un pas de temps qui est inférieur au temps de réaction du VTC, qui se situe aux alentours de 10 min (Lee et al., 2013).

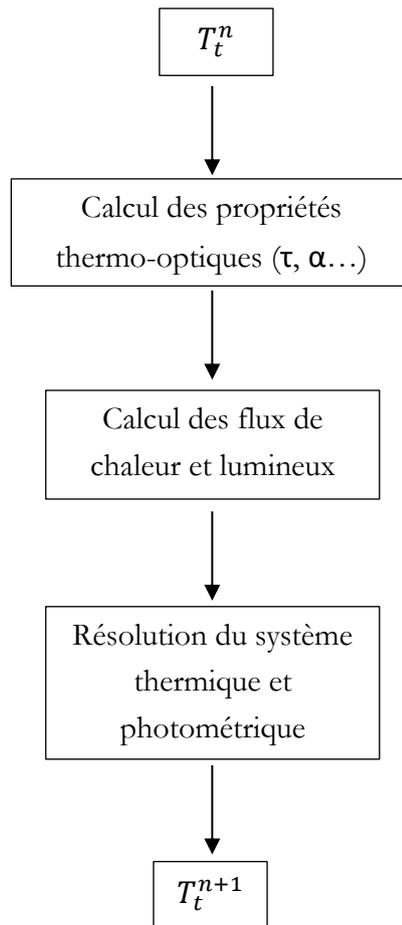


Figure 3-16 : Synoptique de la méthode décalée pour la fonction de contrôle

Le phénomène de variation en fonction de la température est une partie de l'amélioration du modèle du comportement du VTC. Dans la suite du chapitre nous allons aussi proposer une approche différente des codes classiques en physique du bâtiment.

3.3 MODELISATION EN 2D PLANE DU VITRAGE THERMOCHROME

Le vitrage thermochrome (VTC) a la capacité de changer de couleur en fonction de la chaleur. En effet, plus il s'échauffe, plus il se teinte et inversement. Dans le chapitre 2, nous avons pu observer le comportement du VTC dans plusieurs conditions différentes climatiques. Il est à retenir de ce chapitre que le VTC soumis au rayonnement solaire atteint des niveaux de température élevés. On peut aussi ajouter qu'il existe une différence de température entre 2 points de la surface du VTC si une partie se retrouve exposée au rayonnement solaire et une autre à l'ombre. Cela provoque donc une répartition non homogène du champ de température. Visuellement, il a pu être observé une

hétérogénéité de la couleur sur la surface du VTC, qui implique une répartition hétérogène de la transmittance. Dans la littérature, ce phénomène d'hétérogénéité a aussi été décrit dans Lee et al. (2013). Néanmoins, d'après nos recherches bibliographiques, nous n'avons trouvé aucune prise en compte de ce phénomène dans la modélisation du VTC.

Nous avons donc décidé d'inclure ce phénomène pour l'amélioration du modèle du VTC. Le modèle proposé décrit une répartition spatiale en 2D sur la surface du vitrage des bilans thermiques avec prise en compte fine des masques proches et lointains, comme montré sur la Figure 3-17.

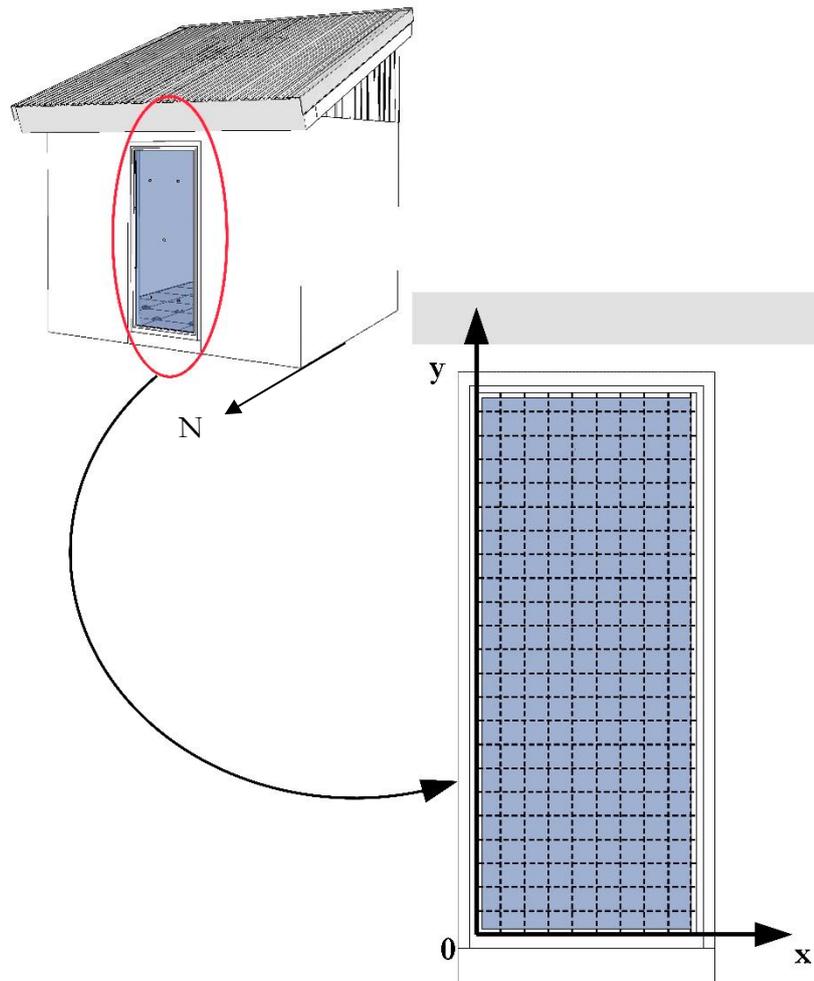


Figure 3-17 : Surface d'étude du VTC et grille de modélisation

Le problème que nous souhaitons résoudre est la diffusion de la chaleur sur une plaque 2D avec prise en compte des sollicitations extérieures radiatives (CLO et GLO) et convectives. Pour cela nous allons poser des hypothèses pour pouvoir résoudre le problème thermique. Nous allons ensuite, mettre le problème en équation.

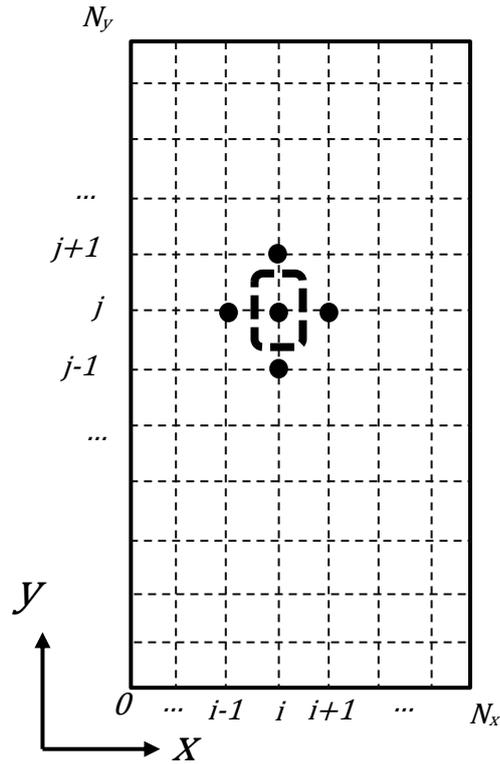


Figure 3-18 : Domaine de discrétisation spatiale détaillé pour les différences finies

Tout d'abord, nous posons des hypothèses sur la géométrie de la discrétisation spatiale. En effet, la discrétisation spatiale se fera par la méthode des différences finies (quadrant) de façon régulière sur les axes X et Y , mais non similaire, comme illustré sur la Figure 3-18. C'est-à-dire que le pas d'espace sur X peut être différent de celui sur Y , mais que le même pas d'espace est conservé tout au long d'un axe.

Les conditions aux limites du problème sont de type Dirichlet. Nous allons imposer ici, la température des nœuds de bords de la surface, par les données issues de la mesure (chapitre 2). De plus, l'absorption solaire, les échanges convectifs et les sollicitations radiatives GLO se feront sur les nœuds de surface. Les sollicitations seront donc intégrées à l'équation de la chaleur sous forme de source de chaleur interne au domaine. Nous allons aussi considérer le milieu homogène en tout point du domaine d'étude. A partir de ces hypothèses, il est donc possible d'écrire l'équation finale pour le problème thermique.

L'équation de la chaleur est celle qui gouverne ce problème. Nous allons donc formuler cette équation en deux dimensions et en coordonnées cartésiennes, soit pour $T(x, y, t)$:

$$\mu \cdot C \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \lambda \left[\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} \right] + P_{CLO} + P_{conv} + P_{rad} \quad (44)$$

Avec :

$$\begin{aligned}
P_{CLO} &= \alpha_s(T) [I_{dir,inc}(x, y) + I_{dif,hor}] \\
P_{conv} &= h_{cve}(T_{ae} - T(x, y, t)) + h_{cvi}(T_{ai} - T(x, y, t)) \\
P_{rad} &= h_{rc}(T_c - T(x, y, t)) + h_{env}(T_{env} - T(x, y, t)) \\
&\quad + h_{ri}(T_{rm} - T(x, y, t))
\end{aligned} \tag{45}$$

Nous remarquons que dans l'équation (44) le terme λ , est en dehors de la parenthèse car cela résulte de notre hypothèse de départ sur l'homogénéité du milieu étudié.

Pour résoudre l'équation de la chaleur, nous utilisons la méthode des différences finies, par schéma implicite. Cela permet de maîtriser et d'ajuster le pas de temps, qui sera nécessaire pour la simulation. De plus, la discrétisation temporelle est en avant ($t = n \Delta t$), et la discrétisation dans l'espace est centrée ($x = i \Delta x$ et $y = j \Delta y$).

On a alors :

$$\left\{ \begin{aligned}
\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{i,j}^{n+1} &= \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} \\
\left(\frac{\partial T}{\partial x^2}\right)_{i,j}^{n+1} &= \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \\
\left(\frac{\partial T}{\partial y^2}\right)_{i,j}^{n+1} &= \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2}
\end{aligned} \right. \tag{46}$$

Il est alors possible d'écrire en reprenant l'équation (44) :

$$\begin{aligned}
\mu \cdot C \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} &= \lambda \left[\frac{T_{i+1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} \right] + \alpha_s \cdot I_{i,j} \\
&\quad + h_{cve}(T_{ae} - T_{i,j}^{n+1}) + h_{rc}(T_c - T_{i,j}^{n+1}) + h_{env}(T_{env} - T_{i,j}^{n+1}) \\
&\quad + h_{cvi}(T_{ai} - T_{i,j}^{n+1}) + h_{ri}(T_{rm} - T_{i,j}^{n+1})
\end{aligned} \tag{47}$$

On pose :

$$\left\{ \begin{aligned}
a &= \frac{\lambda}{\mu \cdot C} \\
\gamma_x &= a \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \\
\gamma_y &= a \frac{\Delta t}{\Delta y^2}
\end{aligned} \right. \tag{48}$$

Finalement, on obtient l'équation du champ de température sur la surface du vitrage :

$$\begin{aligned}
T_{i,j}^n = T_{i,j}^{n+1} & \left[1 + 2\gamma_x + 2\gamma_y + \frac{\Delta t}{\mu \cdot C} (h_{ce} + h_{rc} + h_{env} + h_{cvi} + h_{ri}) \right] \\
& - \gamma_x (T_{i+1,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1}) - \gamma_y (T_{i,j+1}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1}) \\
& - \frac{\Delta t}{\mu \cdot C} (\alpha_s \cdot I_{i,j} + h_{ce} \cdot T_{ae} + h_{rc} \cdot T_c + h_{env} \cdot T_{env} + h_{cvi} \cdot T_{ai} + h_{ri} \cdot T_{rm})
\end{aligned} \tag{49}$$

L'équation peut s'écrire facilement sous forme matricielle et peut être résolue comme un système d'équation linéaire. Le système matriciel se présente ainsi :

$$[T]^n = [A] \cdot [T]^{n+1} + [B] \tag{50}$$

Pour résoudre ce système et calculer les nœuds de température au pas de temps suivant, on inverse la matrice [A], comme suit :

$$[T]^{n+1} = [A]^{-1} \cdot ([T]^n - [B]) \tag{51}$$

On observe aussi dans l'équation (45) qu'il y a une matrice pour le rayonnement CLO direct incident. En effet, selon la position des points de la surface et de la partie exposée au soleil, $I_{dir,inc}$, prendra la valeur du rayonnement du fichier météo ou sera nul.

Il nous faut donc prendre en compte les masques lointains et proches pour représenter au mieux les conditions du champ hétérogène d'absorptance, de transmittance et de température. Pour cela nous allons prendre en considération la projection de l'ombre portée causée par le soleil. Nous allons donc faire appel aux modèles trigonométriques qui régissent la position du soleil par rapport à un observateur précis sur Terre.

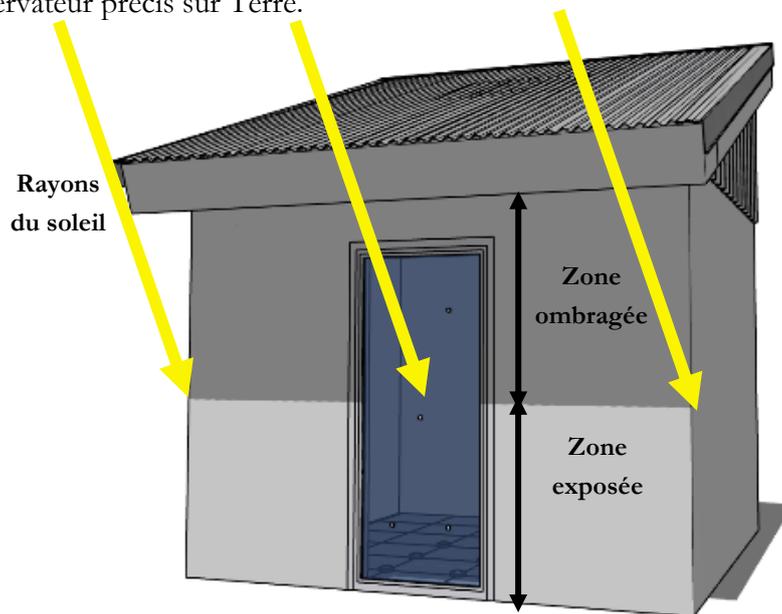


Figure 3-19 : Représentation en 3D des ombres projetées et des surfaces exposées

Pour avoir la position du soleil, nous avons besoin des coordonnées horizontales du soleil (hauteur solaire) et de son azimut. Tout cela va nous donner en fonction des masques la ou les surfaces exposées au rayonnement global (direct et diffus) et les surfaces ombragées (exposées au diffus uniquement) pour chaque pas de temps de calcul. Les étapes de la méthode sont montrées sur la Figure 3-20.

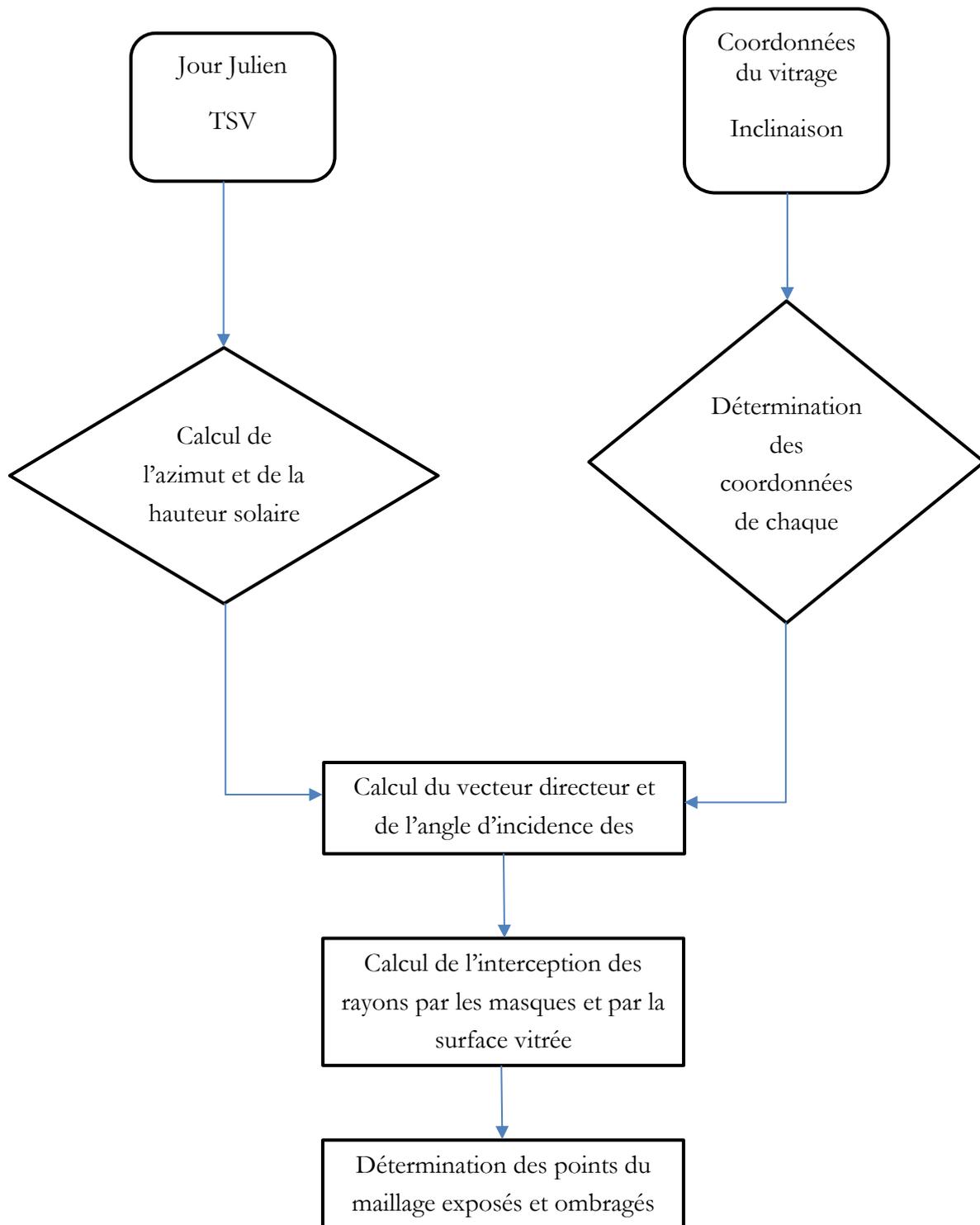


Figure 3-20 : Méthode de détermination des points du maillage ombragés et exposés au rayonnement solaire global, direct et diffus

Les informations sur chaque point du maillage vont affecter le calcul du bilan thermique lié à l'absorption du rayonnement solaire pour chaque pas de temps de simulation. A partir des modèles utilisés dans ce chapitre et du modèle 2D présenté, nous pouvons lancer des simulations avec PITAYA. Sur la Figure 3-21, nous pouvons donc observer, les résultats de la répartition du champ de température sur le VTC pour la journée du 19 Aout 2018. Dans un premier temps, on remarque la répartition hétérogène du champ de température pour chaque heure présentée à l'exception de

08h00, car le VTC n'était pas encore entièrement exposé au rayonnement solaire. Cette répartition est due au masque proche provoquée par le débord de toiture (voir Figure 3-19). Ensuite, on peut également ajouter que le point culminant est atteint à 13h10, où la température du nœud central est égale à 53.5°C. Pour finir, les masques de l'encadrement de la menuiserie ont eux aussi été pris en compte et représentés par le décalage de la surface ombragée vers la droite en fin d'après-midi.

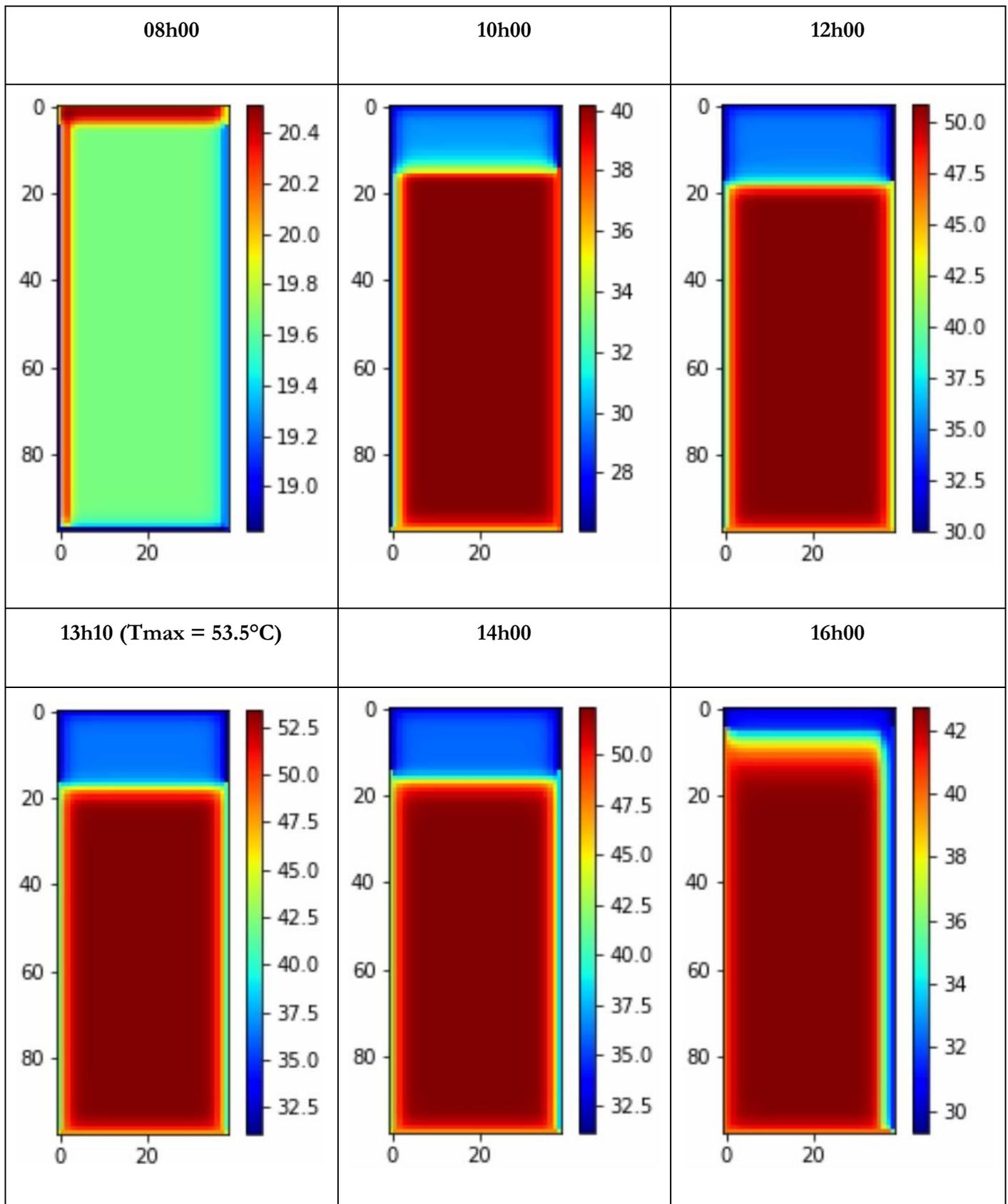


Figure 3-21 : Répartition du champ de température (en °C) sur la surface du VTC pour la journée du 19 Aout 2018

Nous avons utilisé une approche mixte pour la modélisation en 2D du VTC. En effet, pour les conditions aux limites, sur les bords du VTC, nous utilisons les données issues de la mesure des thermocouples placés sous la menuiserie, comme expliqué dans le *Chapitre 2*. Néanmoins, en

effectuant les tests sur les modèles, nous avons remarqué que le profil de température sur les conditions aux limites n'avait que peu d'effet sur la solution du champ de température. Nous avons donc conclu que l'absorption du rayonnement est plus grande devant la diffusion 2D de la chaleur. Pour une utilisation future du modèle en simulation, il sera possible de définir les conditions aux limites constantes en les forçant par la température de la paroi sur laquelle est placée le VTC.

3.4 COUPLAGE AU SYSTEME BATIMENT

Pour modéliser le système global du bâtiment, nous avons assemblé les modèles physiques : le modèle thermique ainsi que le modèle d'éclairage naturel. De plus, nous effectuons une combinaison de la modélisation en 2D du VTC à la modélisation nodale 1D des autres parois et du nœud d'air. En effet, pour la partie thermique, chaque nœud du maillage sur la surface du VTC sera assemblé dans la matrice d'état $[A]$, et participera à la résolution du système complet. Pour la partie photométrie, nous considérerons le vitrage en deux surfaces distinctes avec des propriétés géométriques différentes à chaque pas de temps (selon les conditions géométriques et la position du soleil). Chaque surface de vitrage aura une température différente ainsi que des propriétés thermo-optiques associées.

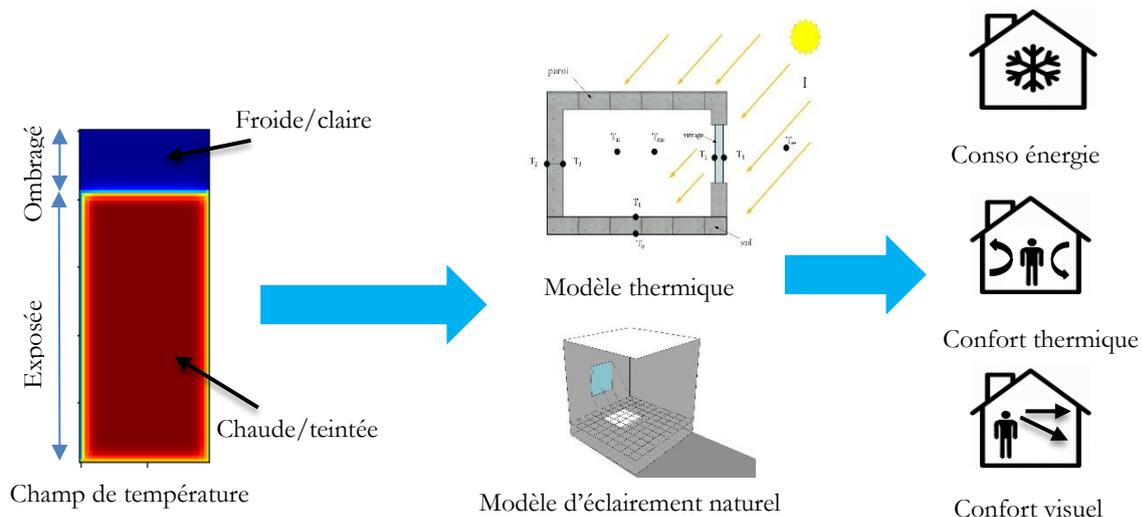


Figure 3-22 : Représentation schématique du couplage du modèle 2D vers le modèle de bâtiment 1D

Grâce au modèle 2D, nous pouvons constater que le vitrage se sépare en deux parties. Une section à l'ombre qui est plus froide et claire et une section exposée qui est plus chaude et teintée, comme montré sur la Figure 2-22. Ces deux parties se retrouvent donc dans des états distincts avec une transmittance et une température différente. De plus, ces deux sections auront des surfaces différentes selon la position du soleil et les conditions météorologiques du ciel (dégagé,

intermédiaire, couvert). Nous proposons de prendre en compte ces deux parties comme deux vitrages différents à chaque pas de temps, avec des surfaces variables.

Nous avons fait le choix d'une modélisation par itération pour effectuer la résolution du système complet implémenté dans PITAYA, comme on peut le voir sur la Figure 3-23. Cela répond aux objectifs et à la stratégie mis en place depuis le début de ce chapitre. En effet, au départ des données initiales le système pourra résoudre le système 2D, puis fournir la température de la surface exposée et ombragée, pour ensuite déterminer les propriétés thermo-optiques. Finalement, PITAYA sera capable de résoudre les systèmes thermique et photométrique, fournir les résultats de la répartition lumineuse ou de la température de l'air intérieur, et ensuite commencer l'itération suivante.

Ayant choisi la méthode des différences finies implicites, il nous est possible de définir un pas de temps adapté à la simulation et aux données d'entrées. Ici, il faudra bien garder en tête que le pas de temps doit toujours être inférieur au temps de réaction du VTC, c'est-à-dire aux alentours de 10 min. Cela permettra une bonne prise en compte de la variation dynamique de son comportement thermo-optique au cours du temps.

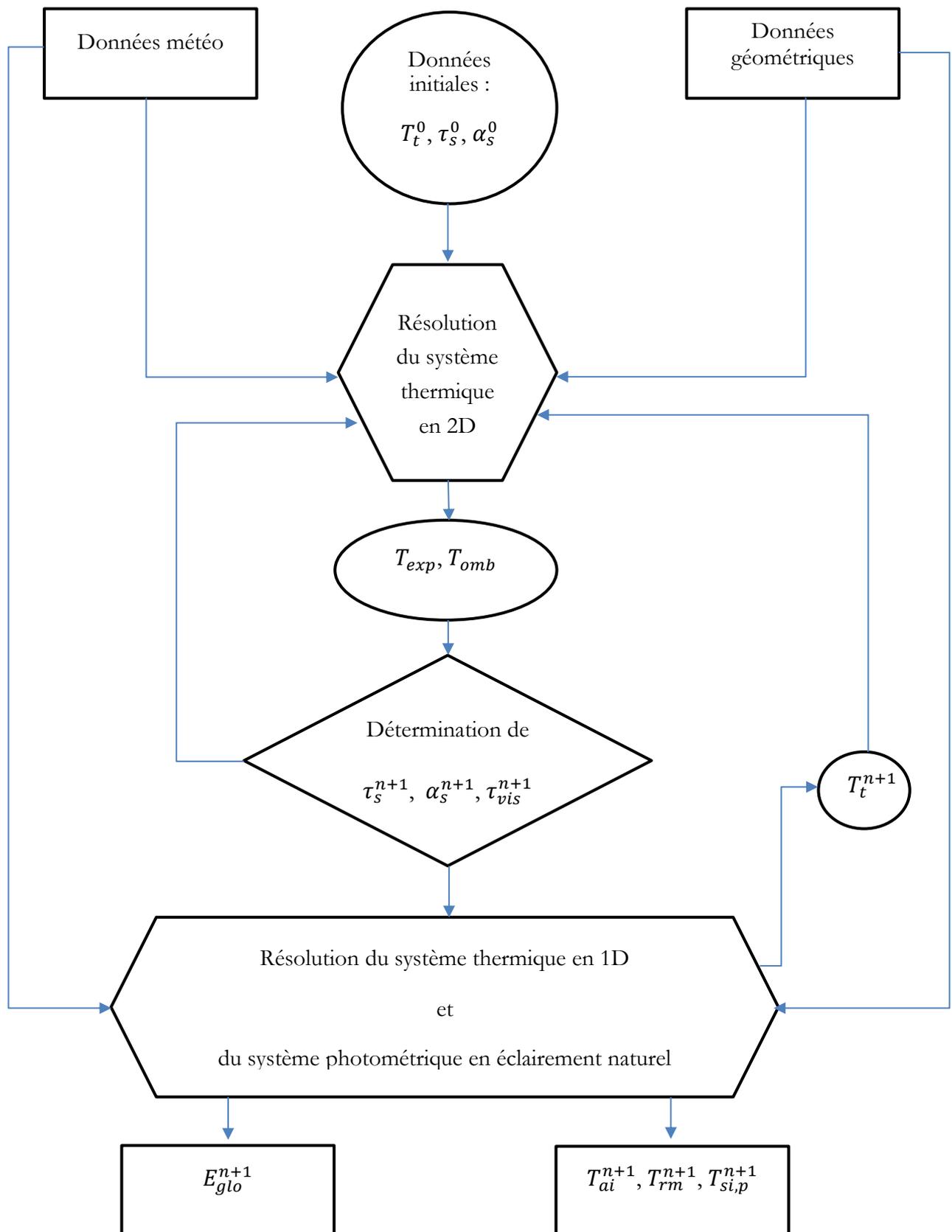


Figure 3-23 : Méthodologie de résolution du système global itératif dans PITAYA

Les résultats du système complet seront à retrouver dans le *Chapitre 4*.

3.5 CONCLUSIONS

Pour rappel, l'objectif de ce chapitre était de modéliser le comportement du VTC sur deux domaines de la physique du bâtiment : la thermique et la photométrie. In fine, les modèles de comportement proposés doivent pouvoir être implémentés dans d'autres codes de calcul de la physique du bâtiment, comme CODYRUN, ISOLAB ou EnergyPlus. Cette stratégie nous a poussé à choisir la méthode Split-flux et le modèle de FAKRA (Fakra, 2009) d'une part pour l'éclairage naturel, et d'autre part la méthode des différences finies implicites pour la thermique. Concernant la convection intérieure, plusieurs modèles ont été présentés et le plus adapté au cas d'étude sera choisi lors de la Validation. L'approche pour le rayonnement extérieur reste classique tant pour le CLO que le GLO. A l'intérieur du bâtiment le modèle de rayonnement GLO choisi est celui de la méthode simplifiée par l'approche sphérique pour les facteurs de forme. Ces modèles choisis permettent d'appréhender les phénomènes de transfert pour un vitrage « normal ».

De plus, nous avons vu comment modéliser la variation des propriétés concernant le VTC. Un nouveau modèle de fonction contrôle de type « sigmoïde » a été proposé pour améliorer la prise en compte de la variation la plus proche des résultats de mesures trouvées dans la littérature en chimie des matériaux. Cette formulation de type « sigmoïde » (courbe en « S ») paramétrée avec les propriétés du VTC est originale et est présentée pour la première fois, dans ce travail de thèse. Ce type de courbe, en plus d'être plus fidèle à la réalité, permet d'avoir une plus large possibilité de solutions pour les propriétés thermo-optiques, ainsi qu'une utilisation simple pour les simulations. En effet, l'utilisateur de PITAYA, aura quelques paramètres à entrer pour configurer la fonction de contrôle contrairement à d'autres codes de calculs, comme EnergyPlus, où il faut entrer chaque propriété thermo-optique pour chaque état de température voulu.

Ensuite, un modèle en deux dimensions a été décrit et proposé pour améliorer la prédiction du comportement du VTC. En effet, après observation expérimentale, le constat est que la répartition de la température est hétérogène sur le VTC. En considérant avec précision les masques proches et la répartition du rayonnement solaire, il est possible de prédire avec précision le champ de température sur la surface du VTC. A partir de ce champ de température hétérogène, on distingue deux surfaces distinctes et similaires. Il a donc été décidé pour coupler le modèle 2D au code nodal 1D, d'introduire à chaque pas de temps deux nouvelles surfaces, avec une température, des propriétés thermo-optiques et des surfaces différentes. Cette prise en compte en 2D du champ de température sur un VTC et le couplage aux codes classiques nodaux 1D est aussi un apport majeur et original de cette thèse.

Finalement, tous les choix et propositions effectués nous mènent à des résultats satisfaisants d'un point de vue théorique et des connaissances actuelles sur le VTC. Néanmoins, une étape de validation est, ici, essentielle pour pouvoir évaluer la fiabilité et la justesse du modèle. C'est pour cela que dans le chapitre suivant, nous allons confronter les résultats des simulations à ceux issus de la mesure expérimentale in situ.

Chapitre 4 VALIDATION EXPERIMENTALE

DU MODELE ET APPLICATION

Dans ce chapitre, nous allons aborder la validation des modèles proposés au *Chapitre 3*. L'objectif est de vérifier que la théorie correspond à la réalité et aux données expérimentales collectées lors de ce travail de thèse. Dans un premier temps, ce chapitre traitera de la validation du modèle thermique 2D du vitrage thermochrome en condition réelle au niveau du champ de température. Dans un second temps, il sera proposé une validation du système de résolution complet de PITAYA (couplage 2D/1D) en observant la température de l'air de la cellule et la répartition lumineuse sur le plan utile. Pour finir, il sera effectué une application comparative du modèle validé avec le logiciel EnergyPlus.

4.1 INTRODUCTION ET METHODOLOGIE

La validation expérimentale de modèle consiste à vérifier si le modèle proposé est fiable et précis. On cherche donc à savoir si le modèle de comportement est fidèle à la réalité. Nous allons confronter les résultats de l'expérimentation à ceux issus des simulations du modèle et ainsi en vérifier la précision des résultats.

La méthode de validation utilisée lors de cette thèse est un processus couramment utilisé dans le domaine de la physique du bâtiment. Cette méthode est décrite dans Bigot (2011) et comporte plusieurs étapes :

1. Observation et comparaison des résultats simulés par le modèle aux mesures (graphiquement et avec des indicateurs statistiques) ;
2. Si l'objectif de validation n'est pas atteint, identification des paramètres générant les erreurs ;
3. Optimisation et ajustement de ces paramètres ;
4. Observation et comparaison de nouveau, pour vérifier l'objectif de validation ;
5. Corroboration des résultats sur une ou plusieurs autres séquences expérimentales.

Le critère de validation admis pour une confrontation à la mesure est de l'ordre de $\pm 1^\circ\text{C}$, ce qui représente l'incertitude des instruments de mesures et des capteurs. Ce critère de validation s'applique en général sur les grands volumes d'air avec un gradient de température faible. Ici, on étudie une surface verticale soumise et sensible au rayonnement solaire, où la température peut varier entre 15°C et 85°C . Cette plage de température est similaire à ce qu'on a l'habitude d'observer sur une toiture inclinée en milieu tropical (Bigot, 2011; Guichard, 2013; Miranville, 2002).

Dans cette étude de validation, nous allons nous baser sur le critère, ψ , lié à l'amplitude de la température de la séquence étudiée pour valider le modèle de la paroi VTC. Ce critère évalue la proportion de points du résidu qui ne dépasse pas 10% de l'amplitude maximale sur la séquence. Plus il sera élevé, plus le modèle sera juste. L'indicateur, ψ , en pourcentage du nombre de points simulés qui respecte ce critère a été mis en place. Il se calcule comme suit :

$$\psi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \chi_i \quad (52)$$

Où :

$$\chi_i = \begin{cases} 0, & \text{si } \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{\max_{j \in \llbracket 1, N \rrbracket} \hat{y}_j - \min_{j \in \llbracket 1, N \rrbracket} \hat{y}_j} > 0.1 \\ 1, & \text{si } \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{\max_{j \in \llbracket 1, N \rrbracket} \hat{y}_j - \min_{j \in \llbracket 1, N \rrbracket} \hat{y}_j} < 0.1 \end{cases} \quad (53)$$

Avec :

\hat{y}_i $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$ Série de données issues de la mesure

y_i $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$ Série de données simulées

N Nombre total de valeurs de la série

D'autres indicateurs ont aussi été utilisés comme l'erreur moyenne ou MBE¹⁴. Ce dernier permet d'évaluer si les valeurs simulées sont précises ou non, et si le modèle a tendance à sur- ou sous-estimer les mesures. Le MBE se calcule de la manière suivante :

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{N} \quad (54)$$

Nous calculons aussi l'erreur quadratique moyenne ou RMSE¹⁵. Ce dernier, donne un sens de la dispersion ou de la variabilité des valeurs simulées par rapport aux mesures. Cet indicateur est lié à la précision du modèle et se calcule comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}} \quad (55)$$

On considérera le modèle validé si la valeur de ψ est supérieure ou égale à 90% : c'est-à-dire que pour la série étudiée, le résidu reste en dessous du seuil des 10% de l'amplitude maximale pendant au moins 90% du temps. De plus, on cherchera à minimiser la valeur du MBE et du RMSE pour obtenir des résultats optimisés.

Pour l'optimisation, la fonction 'optimize.minimize' avec la méthode 'trust-constr' de la librairie Scipy dans Python a été utilisée pour ajuster les paramètres (The SciPy community, 2020). La méthode 'trust-constr' est un algorithme de région de confiance pour l'optimisation sous

¹⁴ Mean Bias Error

¹⁵ Root Mean Square Error

contrainte. Il oscille entre deux implémentations en fonction de la définition du problème. Il s'agit de l'algorithme de minimisation sous contraintes le plus polyvalent mis en œuvre dans la librairie SciPy et le plus approprié pour les problèmes à grande échelle (Conn et al., 2000).

Dans un premier temps, nous allons apporter des éléments de validation au modèle 2D sur la surface du VTC. Le but est de valider le modèle 2D comme un module 'indépendant' et de prédire le champ de température du VTC. C'est-à-dire que le modèle sera testé seul avec les conditions aux limites et les sollicitations extérieures/intérieures issues de la mesure. Grâce à cela, on pourra implémenter le modèle 2D dans n'importe quel autre code de calcul, comme par exemple CODYRUN.

Dans un second temps, nous allons valider le système bâtiment global en thermique et en photométrie avec le modèle 2D intégrée (voir Figure 3-23). Pour la thermique, la validation a été faite sur la température d'air intérieur de la cellule LGI et pour la photométrie, sur les mesures des luxmètres au niveau du plan utile. Pour rappel, un VTC se teinte quand il s'échauffe donc transmet moins d'énergie solaire (et réduit le risque d'éblouissement) à l'intérieur. Au contraire, le VTC s'éclaircit quand il se refroidit, laisse entrer plus de lumière naturelle.

4.2 VALIDATION THERMIQUE DU MODELE 2D

Nous allons commencer par la validation thermique du modèle 2D. Comme vu au *Chapitre 3*, ce modèle simule le champ de température en surface du Vitrage ThermoChrome (VTC), en procédant à une discrétisation spatiale en deux dimensions sur l'ensemble de la surface. Le modèle 2D prend en compte la répartition des sollicitations radiatives et convectives, et aussi les masques proches et lointains pour évaluer plus finement la répartition solaire (CLO).

Tout d'abord, nous avons besoin de connaître les fonctions de contrôle de transmittance et d'absorptance solaire. Pour cela, à partir des données du fabricant extraites depuis la base de données (IGBD¹⁶) du logiciel WINDOW 7.7¹⁷, un ajustement de courbe a été effectué. Le but est de reconstruire les courbes à partir de la fonction mathématique (*Equation 43*) décrite dans le *Chapitre 3* et d'ajuster les paramètres pour se rapprocher de la courbe du fabricant. Dans la littérature anglo-saxonne, le terme utilisé est 'curve fitting'. Les méthodes de régression utilisées en général sont multilinéaires ou polynomiales et, dans notre cas, elle est logistique. Les propriétés thermo-optiques dépendant de la température du VTC sont à retrouver dans le *Chapitre 2*.

Dans le Tableau 4-1, tous les paramètres sont déjà connus sauf le coefficient de pente, c .

¹⁶ International Glazing Data Base

¹⁷ Logiciel qui permet de calculer les indices de performance thermique totale des fenêtres, développé par le Berkeley Lab

Tableau 4-1 : Paramètres de la fonction de contrôle pour la transmittance et l'absorptance solaire après ajustement par régression logistique

	Max	Min	Température de transition	Coefficient de pente (après ajustement)	R ²
Transmittance	0.342	0.088	49.6	0.06378	0.9988
Absorptance	0.868	0.601	49.6	0.06271	0.9989

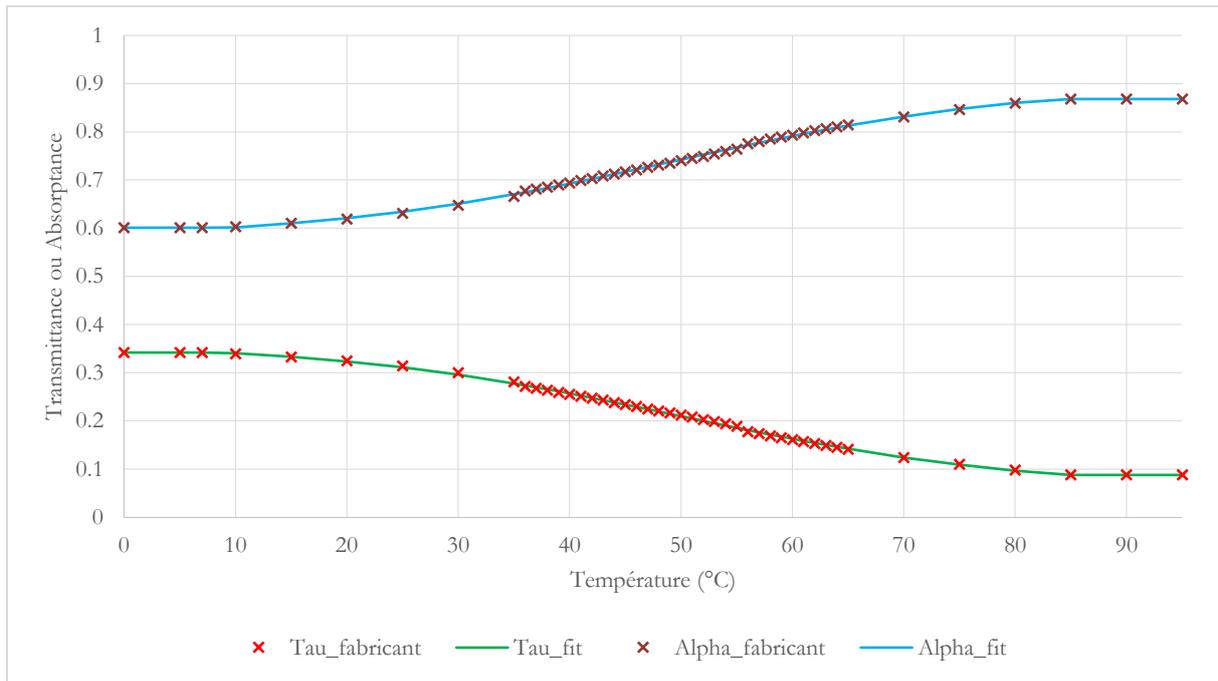


Figure 4-1 : Transmittance et absorptance solaire avec données du fabricant et ajustement par régression logistique

Sur la Figure 4-1, on observe qu'à partir des données fournies par le fabricant, les courbes de la transmittance et de l'absorptance sont bien ajustées (avec un R² proche de 1). Ce qui nous permet d'implémenter les deux équations avec les paramètres ajustés dans PITAYA pour la simulation.

Pour la validation du modèle en 2D plane du VTC, la séquence expérimentale utilisée est celle du 24 au 29 septembre 2018 (inclus). Cette séquence a été choisie car elle est représentative de l'intersaison à La Réunion (fin de l'hiver et début de l'été) et la course du soleil se trouve complètement au Nord. La position du soleil au Nord est un paramètre important car le VTC sur la LGI est orienté vers le Nord et on souhaite l'étudier quand il est soumis au rayonnement solaire, en prenant en compte l'impact du débord de toiture (protection solaire). Nous présentons sur les figures Figure 4-2 à Figure 4-4, le rayonnement solaire global et diffus, le couple température et humidité relative, ainsi que le couple vitesse et direction du vent.

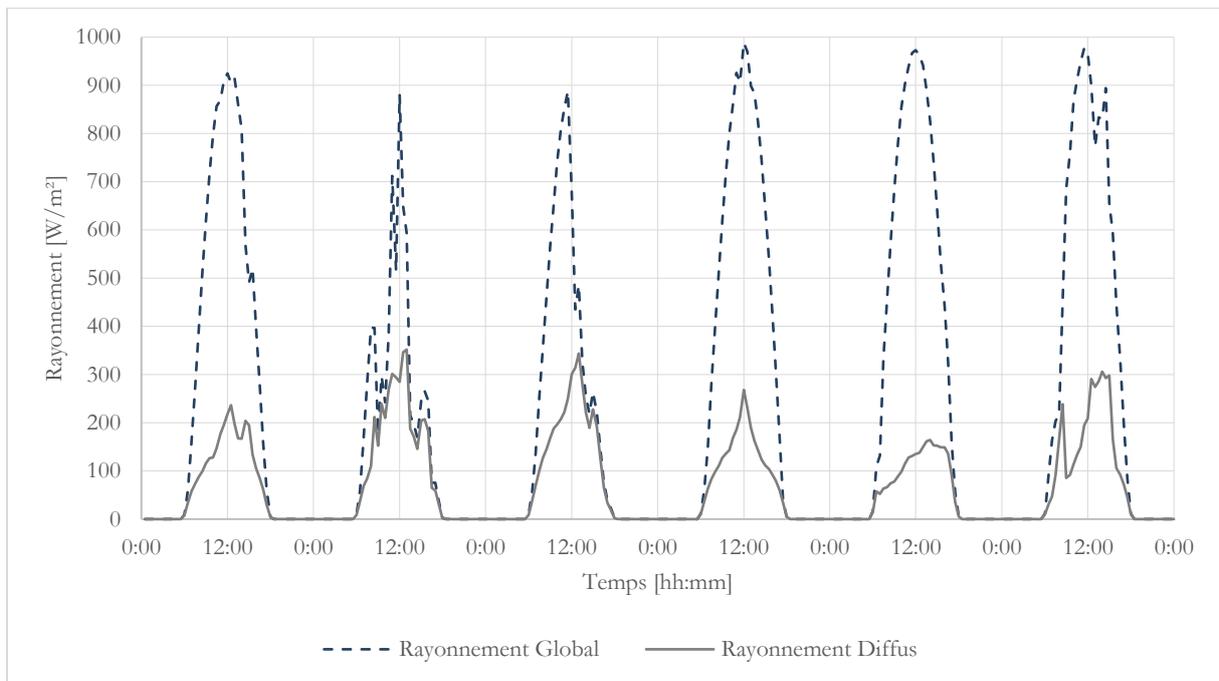


Figure 4-2 : Rayonnement solaire global et diffus sur un plan horizontal pour la séquence du 24 au 29 Septembre 2018

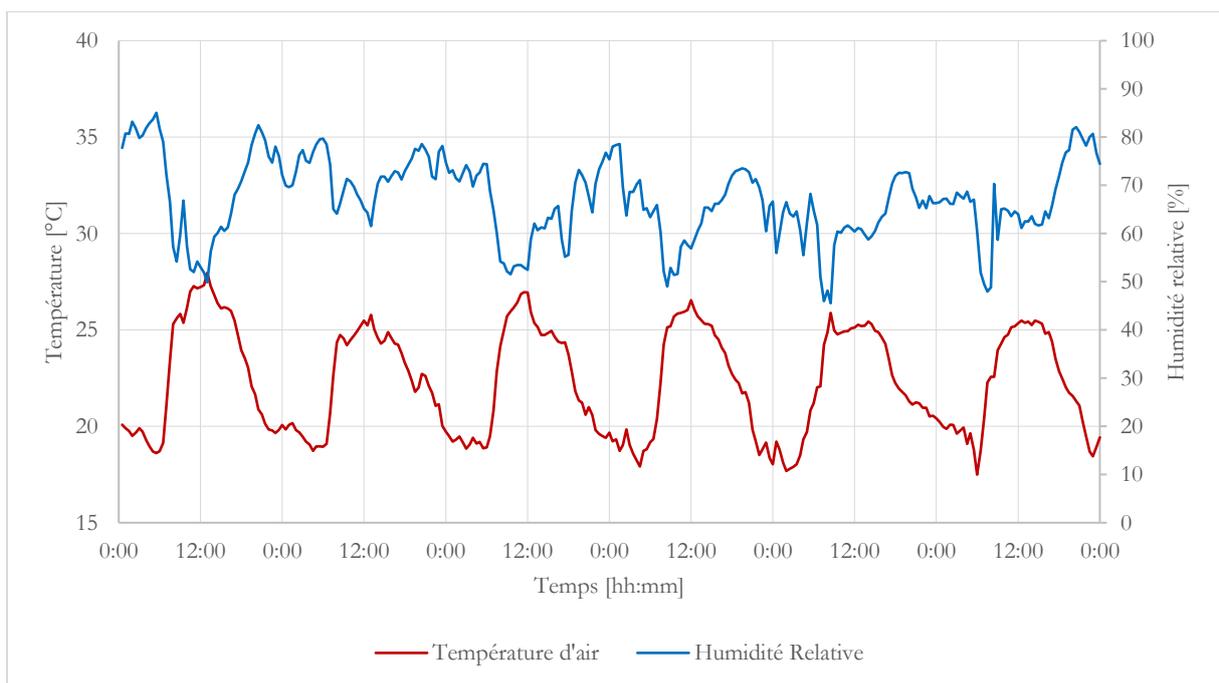


Figure 4-3 : Température d'air et humidité relative extérieure pour la séquence du 24 au 29 Septembre 2018

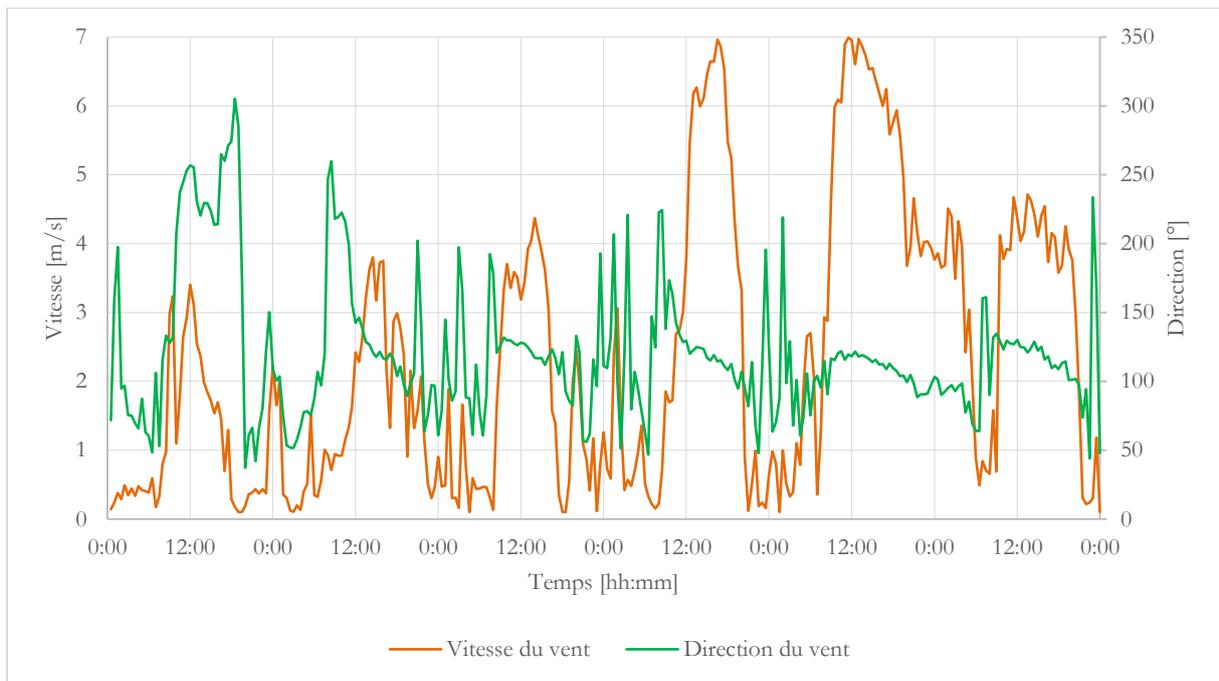


Figure 4-4 : Vitesse et direction du vent pour la séquence du 24 au 29 Septembre 2018

Sur la Figure 4-2, on constate que la séquence comporte de nombreuses journées avec un rayonnement global horizontal maximum entre 880 et 988 W/m² (aux alentours de 12h00). Dans cette séquence, nous sommes en présence d'un temps ensoleillé avec ciel clair. En effet, les courbes de rayonnement sont lisses et forment une parabole régulière. Cependant, on relève aussi que dans cette séquence, nous avons un ensoleillement parfois similaire à celui d'un ciel nuageux ou partiellement couvert, comme pour le 25 ou le 26 Septembre.

Sur la Figure 4-3, on observe les cycles de température d'air qui varie entre 17 °C (pendant la nuit) et 28 °C (aux alentours de 12h00). Concernant, l'humidité relative la courbe varie entre 85 % (pendant la nuit) et 45% (pendant la journée). Ce sont des valeurs normales d'intersaison dans les bas de La Réunion.

Sur la Figure 4-4, la vitesse du vent, peut atteindre au maximum jusqu'à 6.95 m/s pendant la journée. On peut noter pendant la journée, quand le vent est fort, que le vent vient du Sud-Est. Cependant, on constate de fortes fluctuations de direction pendant la nuit jusqu'au matin vers 8h00, où les valeurs de vitesse sont faibles. Ces données correspondent aux caractéristiques d'une localisation sur la côte exposée au vent au régime des Alizés.

Le modèle 2D en surface du VTC prend en compte les sollicitations extérieures et intérieures, des modèles élémentaires discutés au *Chapitre 3*. Les conditions aux limites du modèle 2D sont issues des mesures de température relevées aux bords de la menuiserie du VTC (*voir Chapitre 2*). Pour les termes sources des sollicitations extérieures, il a été choisi de tester plusieurs modèles de convection. Concernant le rayonnement GLO, on décide d'appliquer une différence sur la température du ciel par rapport à la température d'air extérieur ($T_c = T_{ae} - 6^\circ$). De plus, on va considérer que la température radiative de l'environnement sera égale à celle de l'air extérieur

($T_{env} = T_{ae}$). On utilise les coefficients radiatifs associés $h_{rc} = 4.7 W.K^{-1}.m^{-2}$ et $h_{env} = 5.7 W.K^{-1}.m^{-2}$.

Pour l'intérieur, le modèle de convection de Alamdari & Hammond (1983) a été choisi. L'approche simplifiée et sphérique a été retenue pour le modèle de rayonnement GLO intérieur.

Il est à noter que dans le cadre spécifique de cette validation du modèle 2D, la température d'air intérieur, T_{ai} , et la température radiante moyenne, T_{rm} , sont considérées comme des termes sources de sollicitations. Pour la conduction, une discrétisation spatiale en quadrant est effectuée ainsi que l'hypothèse de considérer la conductivité thermique en 2D homogène et non dépendant de la température.

Dans le *Chapitre 3*, il a été discuté de l'importance du pas de temps de la simulation pour bien prendre en compte l'effet de changement de propriétés du VTC, dans un modèle dit 'décalé'. En effet, dans la littérature, le pas de temps préconisé pour la simulation est aux alentours de 10min (Eleanor S. Lee et al., 2013), mais cela dépend du type de VTC. Avant de commencer les travaux de validation, on a donc effectué des tests pour évaluer le pas de temps convenable pour notre étude. Le but étant de garder un pas de temps permettant d'obtenir un temps de simulation acceptable avec une la plus petite somme totale du RMSE pour chaque position sur VTC. Sur la Figure 4-5, la somme totale des RMSE se lit sur la gauche et le temps de simulation (en sec) se lit sur la droite.

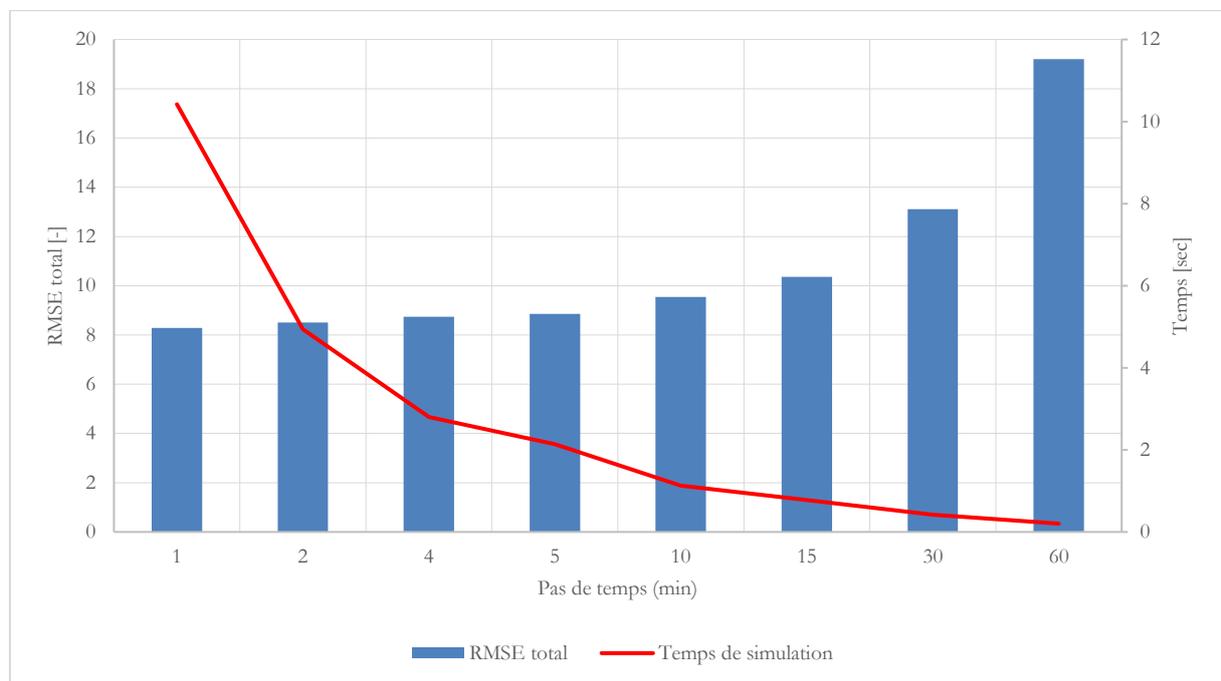


Figure 4-5 : Somme totale du RMSE pour chaque position sur le VTC en fonction du pas de temps de simulation

Le pas de temps le plus cohérent pour la suite des travaux a ainsi été évalué à 15min (voir Figure 4-5), avec un temps de simulation de 0.7815 (13x plus rapide par rapport au pas de temps de 1min) pour un RMSE total de 10.36. De manière analogue, pour le pas d'espace, il a été trouvé que 5cm sur x et sur y était acceptable pour la suite des travaux de validation. Ceci présentait le meilleur

équilibre entre précision des résultats et temps de simulation de l'ordre de la seconde. Par exemple pour une journée ($\Delta t = 15\text{min}$) avec un pas d'espace de 1cm (sur x et y) le temps de simulation est de 4min25s, alors que pour 5cm le temps est de 1s pour des indicateurs de validation similaire, soit 264 fois plus rapide.

Pour la première confrontation de la simulation aux mesures, nous avons décidé de tester les résultats pour différents modèles de convection extérieure connue. En effet, le paramètre de convection extérieure étant influent sur la prédiction du champ de température du VTC, il est judicieux de pouvoir simuler avec plusieurs modèles différents et observer quelle corrélation approche le mieux les résultats expérimentaux. Tous les modèles ont été testés mais pour faciliter la lecture du graphique, seuls les résultats les plus pertinents sont présentés. L'ensemble des résultats statistiques est à observer dans le Tableau 4-2.

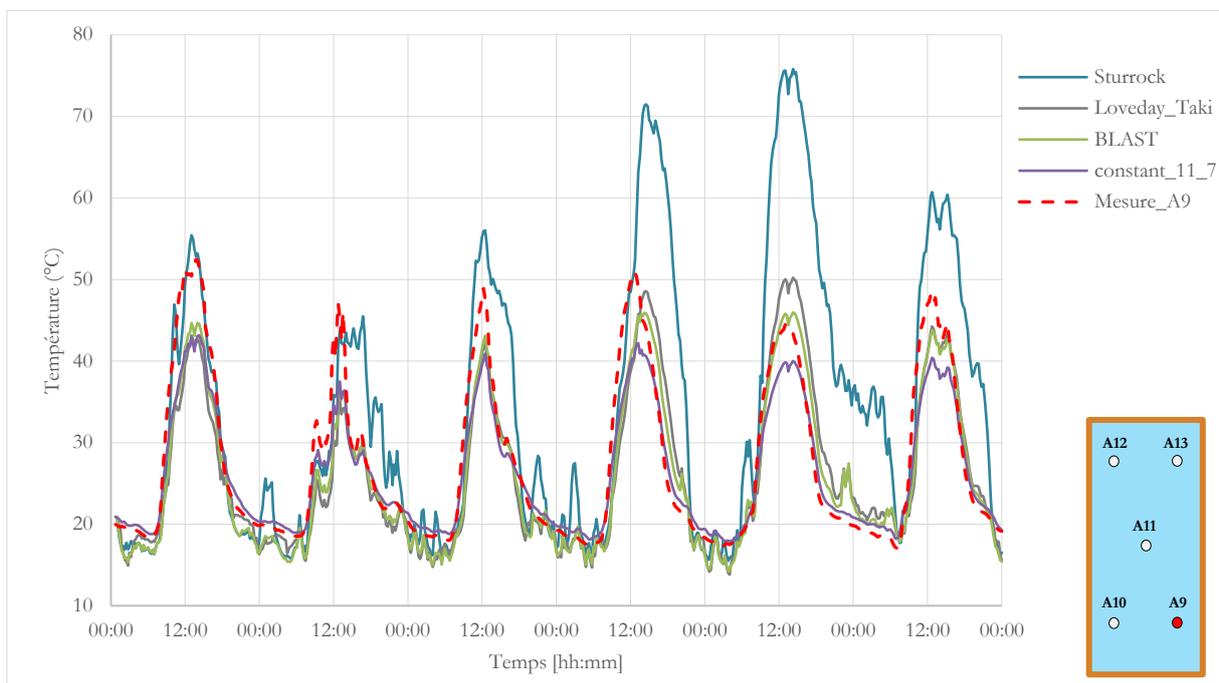


Figure 4-6 : Comparaison des profils de température pour différents modèles convectifs extérieurs entre les simulations et la mesure pour la position A9

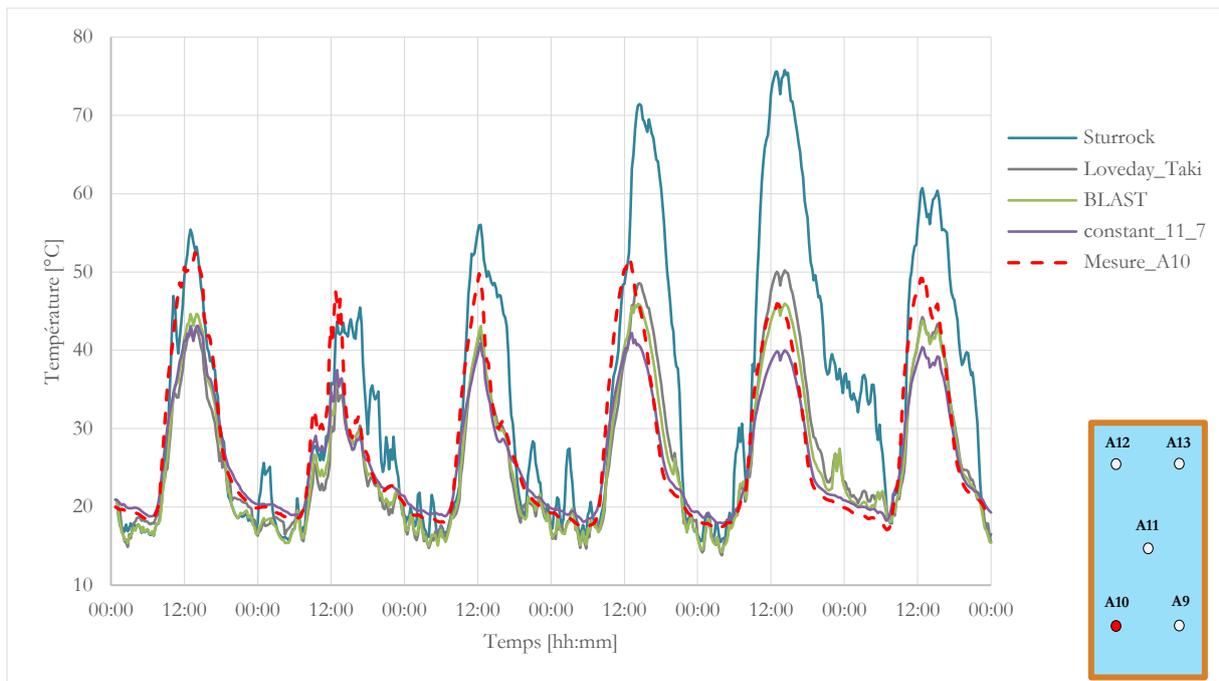


Figure 4-7 : Comparaison des profils de température pour différents modèles convectifs extérieurs entre les simulations et la mesure pour la position A10

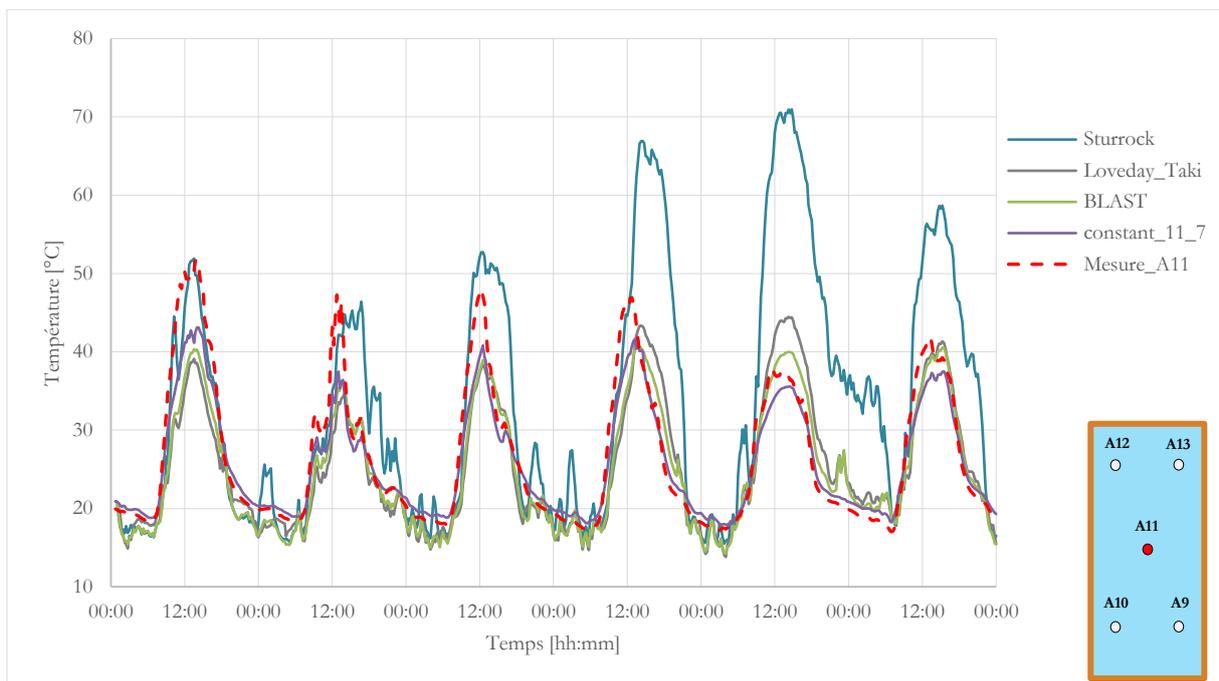


Figure 4-8 : Comparaison des profils de température pour différents modèles convectifs extérieurs entre les simulations et la mesure pour la position A11

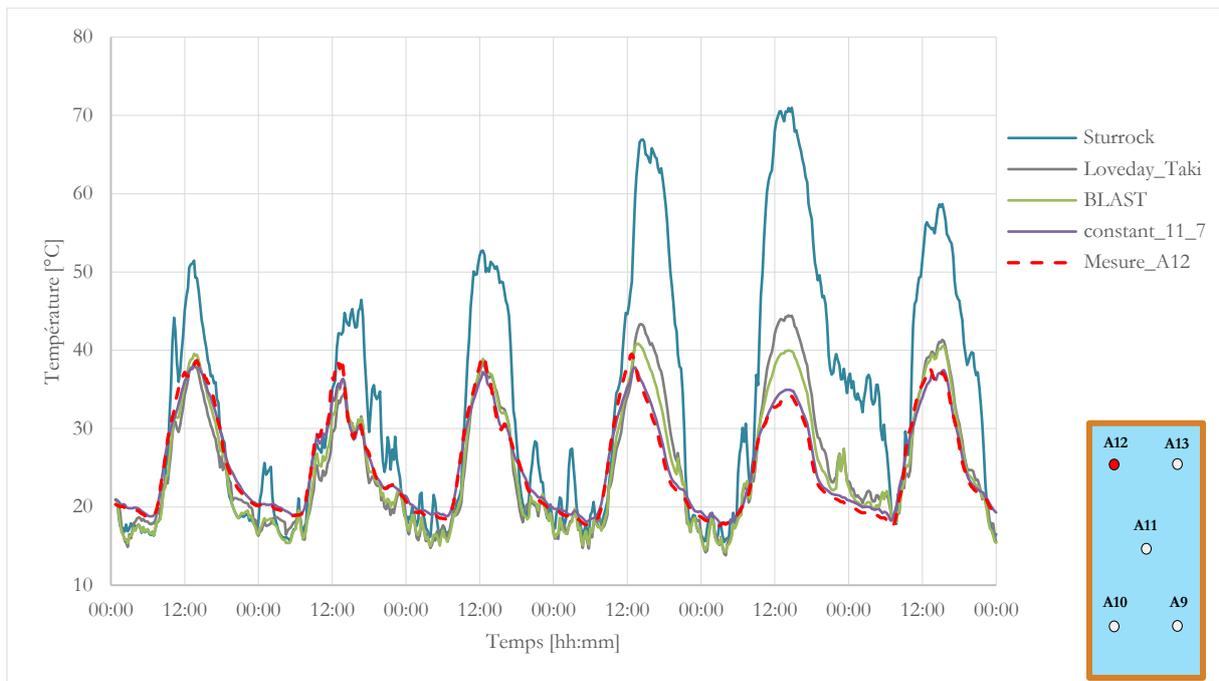


Figure 4-9 : Comparaison des profils de température entre les simulations pour différents modèles convectifs extérieurs et la mesure pour la position A12

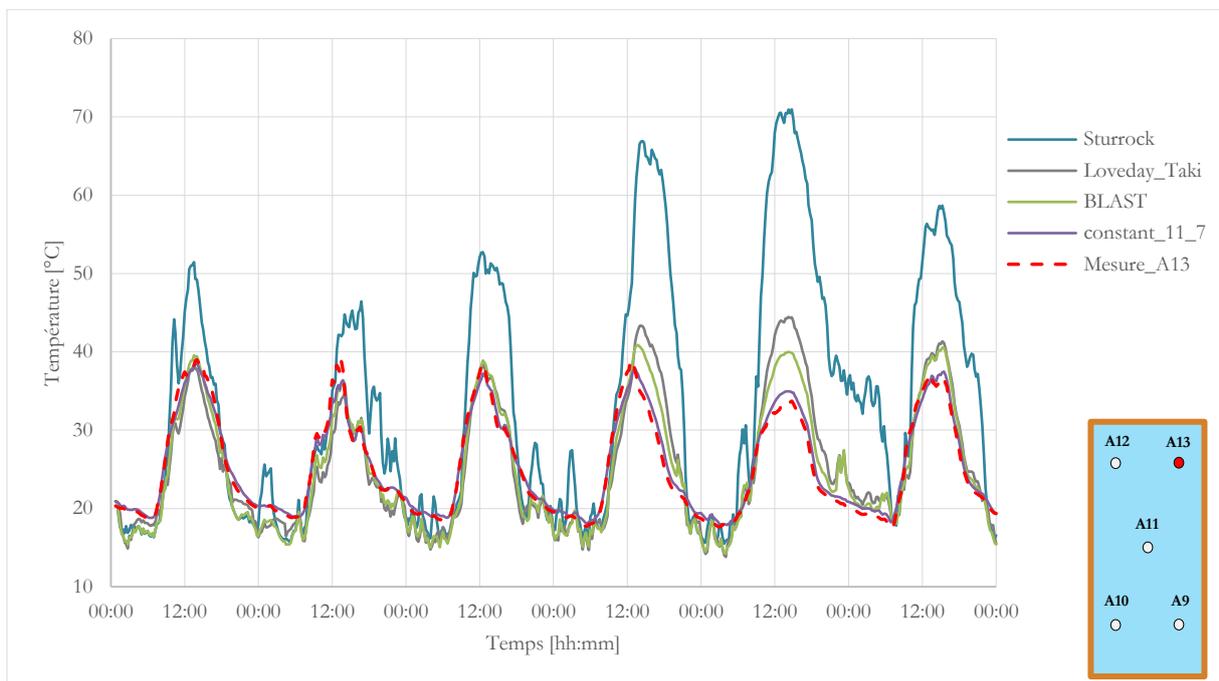


Figure 4-10 : Comparaison des profils de température entre les simulations pour différents modèles convectifs extérieurs et la mesure pour la position A13

Tableau 4-2 : Indicateurs de validation pour les différents modèles convectifs extérieurs pour chaque position

		MBE	RMSE	ψ [%]			MBE	RMSE	ψ [%]
Sturrock	Position 9	-6.55	12.68	47.0	Jayamaha	Position 9	-3.81	7.02	57.5
	Position 10	-6.31	12.29	47.6		Position 10	-3.58	6.62	59.2
	Position 11	-6.95	13.00	47.6		Position 11	-3.99	6.94	58.2
	Position 12	-8.06	13.82	31.2		Position 12	-4.85	7.61	49.1
	Position 13	-8.17	14.01	31.0		Position 13	-4.95	7.79	48.4
Loveday & Taki	Position 9	1.41	5.05	63.1	ASHRAE	Position 9	1.93	4.34	72.3
	Position 10	1.65	4.99	63.4		Position 10	2.16	4.51	70.7
	Position 11	1.10	4.75	63.6		Position 11	1.57	3.81	76.7
	Position 12	0.06	3.89	47.4		Position 12	0.50	1.98	72.6
	Position 13	-0.04	4.02	45.3		Position 13	0.39	2.02	73.2
Tourrand	Position 9	-1.19	5.21	55.6	IUT	Position 9	-6.15	12.0	47.7
	Position 10	-0.96	5.02	56.1		Position 10	-5.91	11.6	48.1
	Position 11	-1.63	5.21	55.4		Position 11	-6.54	12.3	48.4
	Position 12	-2.79	5.21	56.8		Position 12	-7.65	13.1	34.0
	Position 13	-2.89	5.38	55.7		Position 13	-7.76	13.3	34.1
BLAST	Position 9	1.71	4.09	69.2	BLAST natural	Position 9	-1.72	3.37	79.4
	Position 10	1.94	4.11	69.9		Position 10	-1.50	3.00	80.5
	Position 11	1.42	3.73	69.3		Position 11	-1.79	3.14	79.4
	Position 12	0.41	2.82	50.3		Position 12	-2.52	3.72	63.6
	Position 13	0.31	2.93	47.6		Position 13	-2.62	3.90	62.4
Constant ($h_{ce} = 11.7 W.K^{-1}.m^{-2}$)	Position 9	1.30	3.52	77.0	Constant ($h_{ce} = 6 W.K^{-1}.m^{-2}$)	Position 9	-0.32	2.34	83.4
	Position 10	1.53	3.77	74.9		Position 10	-0.09	2.25	85.2
	Position 11	0.94	2.92	82.6		Position 11	-0.51	2.06	90.4
	Position 12	-0.12	0.83	97.0		Position 12	-1.38	2.02	78.4
	Position 13	-0.22	0.86	98.3		Position 13	-1.48	2.20	76.1

Sur les Figure 4-6 à Figure 4-10, on observe la comparaison des profils de température entre les simulations et la mesure pour différente position sur le VTC. On peut constater que les corrélations liées au vent semblent montrer beaucoup plus de perturbations, surtout le soir, à cause de la variabilité importante de la grandeur. Ces corrélations ont tendance à surestimer la valeur de la température du VTC. Le seul modèle qui intègre une partie de convection forcée et naturelle est le modèle BLAST (Sparrow et al., 1979). Ce dernier montre des résultats graphiques plus proche de la mesure.

Néanmoins, la corrélation avec une valeur constante, $h_{ce} = 11.7 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$, a un profil thermique plus proche de la mesure pour toutes les positions sur le VTC. De plus à partir du Tableau 4-2, on voit que cette corrélation satisfait le plus le critère de validation et elle est plus juste. Il est possible aussi d'observer dans le Tableau 4-2 que le modèle BLAST naturel (convection naturelle seule) et les modèles constants offrent de meilleurs résultats pour la validation, en général. On peut aussi noter que pour certaines positions sur le VTC, la valeur constante influe sur les critères de validation. Par exemple, pour la position 13, on a un $\psi = 98.3\%$, pour un $h_{ce} = 11.7 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$, comparé à $\psi = 76.1\%$ pour un $h_{ce} = 6 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$.

Cela veut dire que la convection est régie uniquement par le tirage thermique dans ce cas précis. En effet, avec un coefficient constant, la différence de température est le seul moteur de la convection. De plus, nous remarquons que selon la position sur le VTC, le coefficient convectif doit être calculer différemment. Il faudra donc bien distinguer le calcul du coefficient pour les points appartenant à la surface à l'ombre et à la surface exposée au rayonnement solaire. Cela renforce notre hypothèse d'une approche d'un modèle convectif extérieur dépendant de la différence de température entre la surface du VTC et l'air extérieur.

Néanmoins, les résultats précédents ne sont pas satisfaisants. Nous allons donc maintenant effectuer une optimisation pour trouver la bonne valeur du coefficient de convection extérieure pour toute la séquence étudiée. Nous allons nous appuyer sur un modèle de convection naturelle utilisé dans le modèle BLAST basé sur le modèle de (Walton, 1983). Bien que ce modèle soit assez complet, il ne prend pas en compte la variation de la hauteur du bâtiment, l'orientation de la surface, l'effet de masque des bâtiments voisins. Le modèle s'écrit comme suit :

$$h_{ce} = m \times |T_{se} - T_{ae}|^{1/3} \quad (56)$$

Dans notre cas, on va chercher à ajuster les coefficients, m , pour la surface exposée et la surface ombragée. On cherchera à minimiser la somme des RMSE de chaque position sur le VTC en utilisant la méthode explicitée dans la partie 4.1

Après optimisation des paramètres, on trouve les valeurs de m dans le Tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Résultats pour l'optimisation du coefficient m pour le modèle de convection extérieure

	Surface exposée	Surface ombragée
m	5.68	4.63

Nous avons décidé de montrer graphiquement que les profils pour certaines positions sur le VTC pour ne pas surcharger le document mais le détail de tous les résultats statistiques est dans le Tableau 4-4 Pour la lecture des graphiques ci-dessous, on trouve en vert la courbe de la simulation avec les paramètres optimisés, en rouge le mesure au point concerné et en gris le résidu.

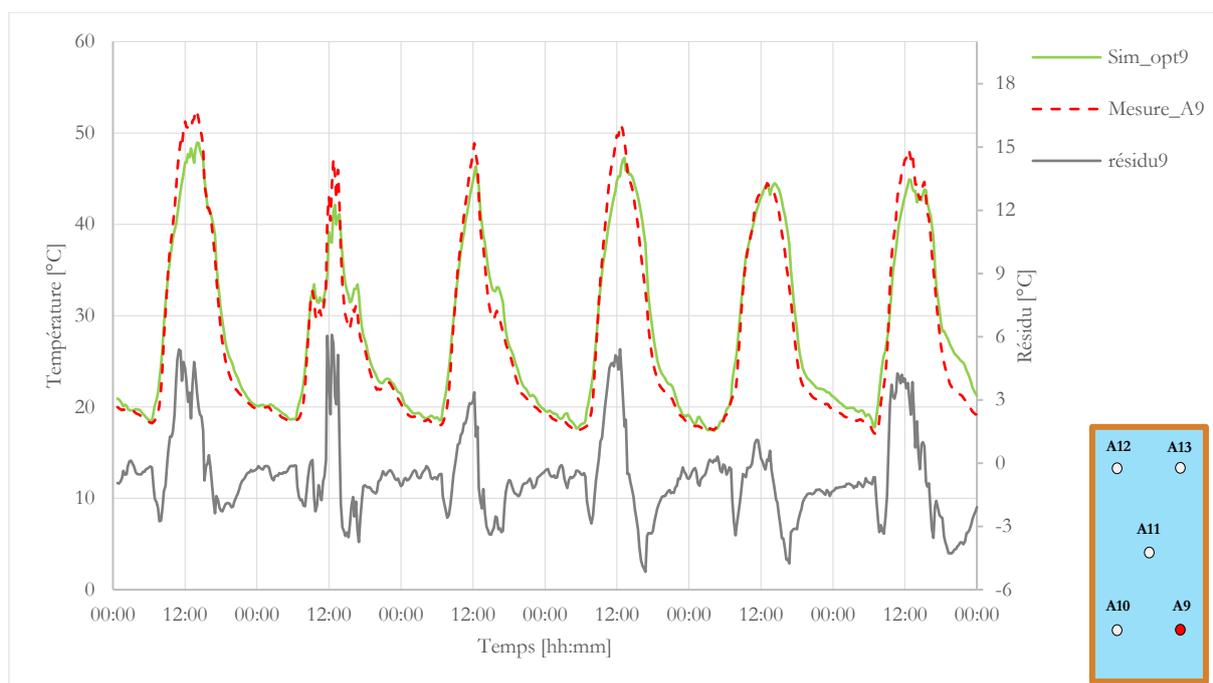


Figure 4-11 : Comparaison des profils de température entre la simulation pour le modèle convectif extérieur optimisé et la mesure pour la position A9

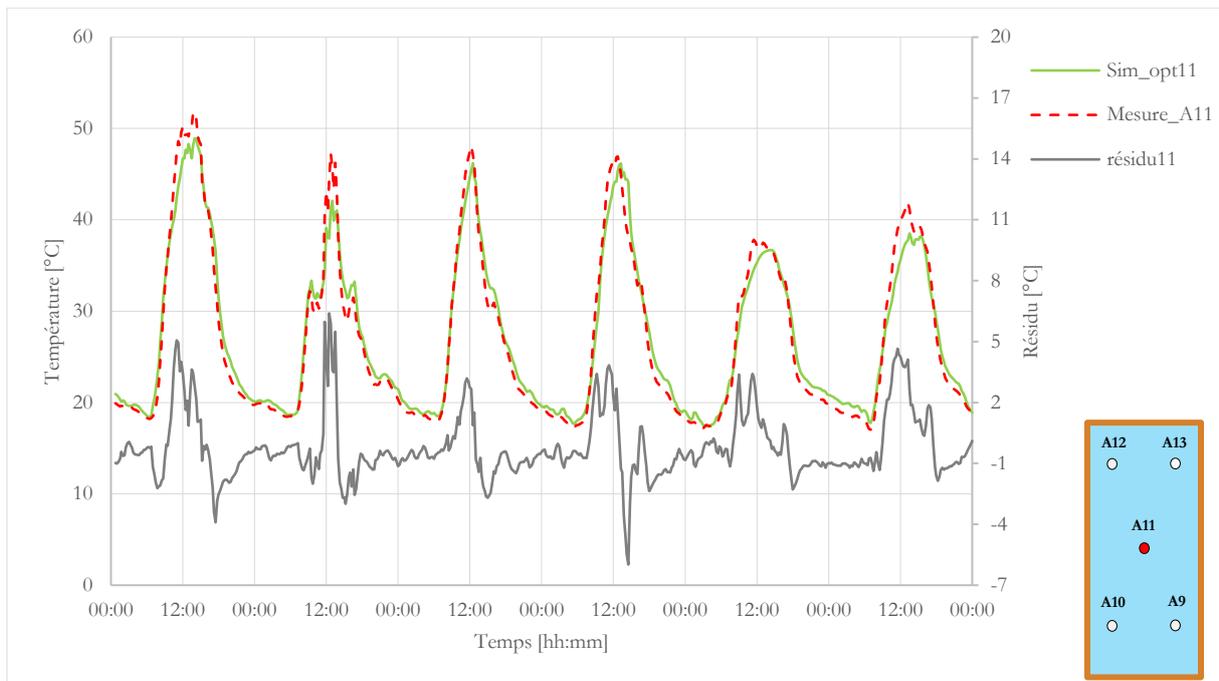


Figure 4-12 : Comparaison des profils de température entre la simulation pour le modèle convectif extérieur optimisé et la mesure pour la position A1

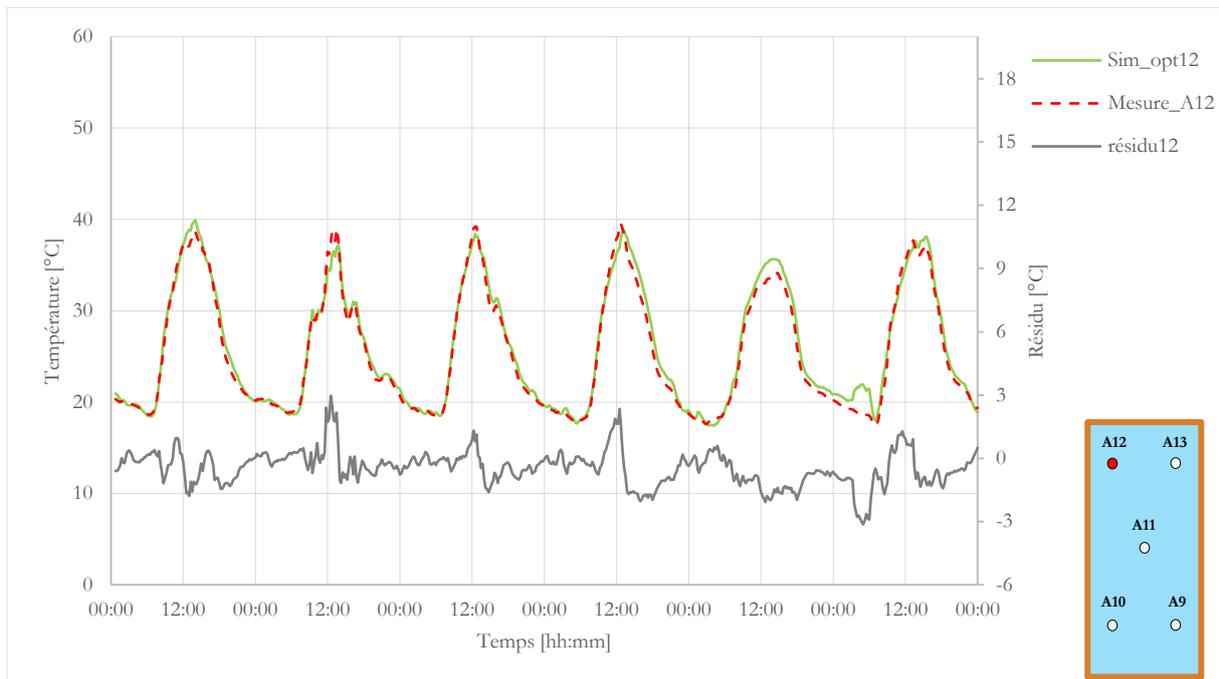


Figure 4-13 : Comparaison des profils de température entre la simulation pour le modèle convectif extérieur optimisé et la mesure pour la position A13

Globalement, sur les Figure 4-11 à Figure 4-13, on observe que le nouveau profil de température optimisé traduit mieux le comportement thermique du VTC pour chaque position. En effet, on remarque que la tendance des courbes suit celles des mesures, sauf à certains moments aux pics de température. Cela se voit de manière plus prononcée sur les positions en partie basse exposée au

rayonnement solaire direct, comme par exemple la position 9, où le résidu peut dépasser 6 °C aux alentours de 12h00.

Tableau 4-4 : Résultats des indicateurs de validation après optimisation du modèle convectif extérieur

		MBE		RMSE		ψ [%]	
		Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Scénario h_{ce} optimisé	Position 9	1.30	-0.66	3.52	2.11	77.0	89.2
	Position 10	1.53	-0.38	3.77	2.08	74.9	89.5
	Position 11	0.94	-0.23	2.92	1.64	82.6	94.3
	Position 12	-0.12	-0.46	0.83	0.95	97.0	97.6
	Position 13	-0.22	-0.63	0.86	1.16	98.3	92.2

Dans le Tableau 4-4, on observe les résultats avant et après optimisation, en comparant d'après le scénario constant $h_{ce} = 11.7 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$. On peut clairement observer l'amélioration de tous les indicateurs de validation pour toutes les positions sur la surface du VTC, sauf pour la position 13 qui a légèrement baissé. On remarque notamment que pour toutes les positions, plus de 89% du temps le seuil des 10% de l'amplitude maximale est respecté, avec la position 11, 12 et 13 qui dépasse les 90%.

L'objectif de validation est presque atteint mais il faut aller plus loin. Nous allons nous intéresser à l'interaction de la convection intérieure et de son effet sur le vitrage. Il y a, là encore, une marge d'amélioration du modèle 2D. A partir du scénario optimisé pour l'extérieur, nous allons procéder comme précédemment, en effectuant les simulations cette fois pour plusieurs modèles connus de convection intérieure.

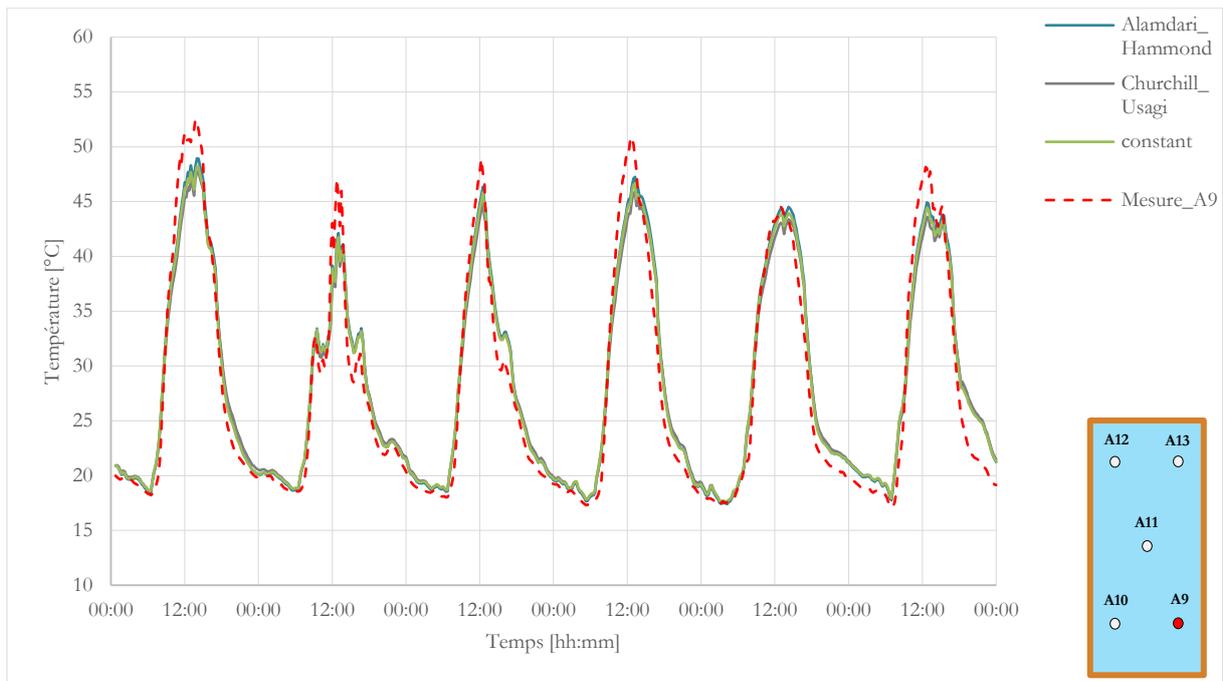


Figure 4-14 : Comparaison des profils de température entre les simulations pour différents modèles convectifs intérieurs et la mesure pour la position A9

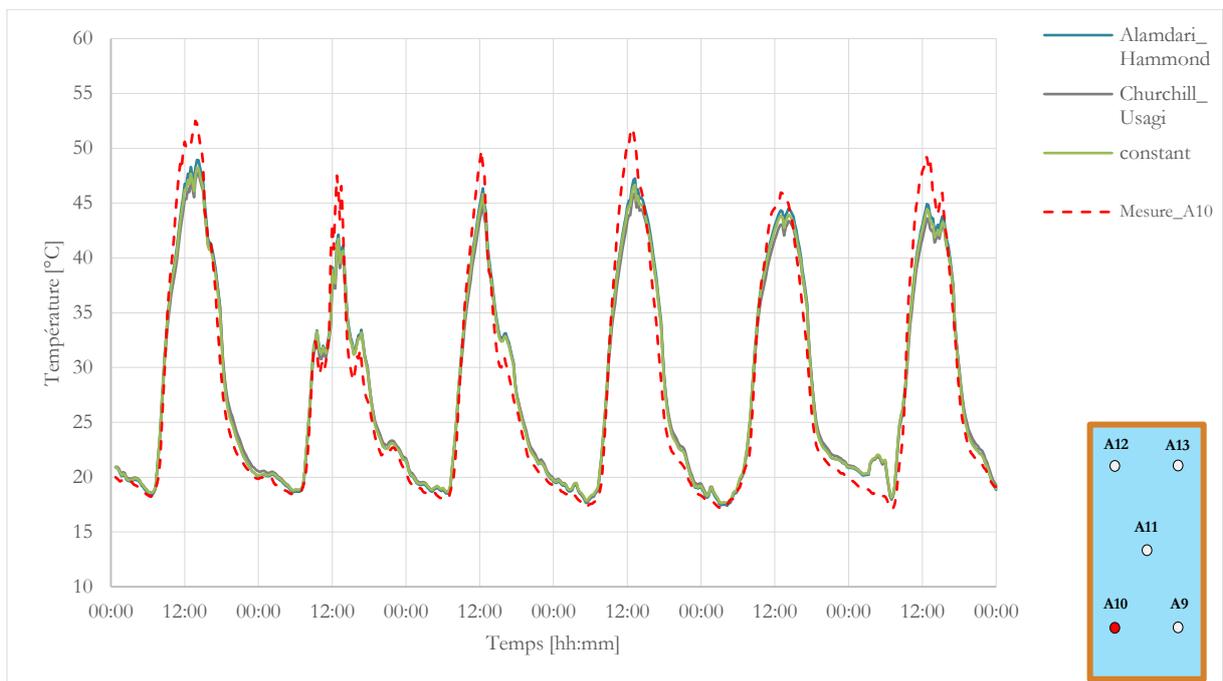


Figure 4-15 : Comparaison des profils de température entre les simulations pour différents modèles convectifs intérieurs et la mesure pour la position A10

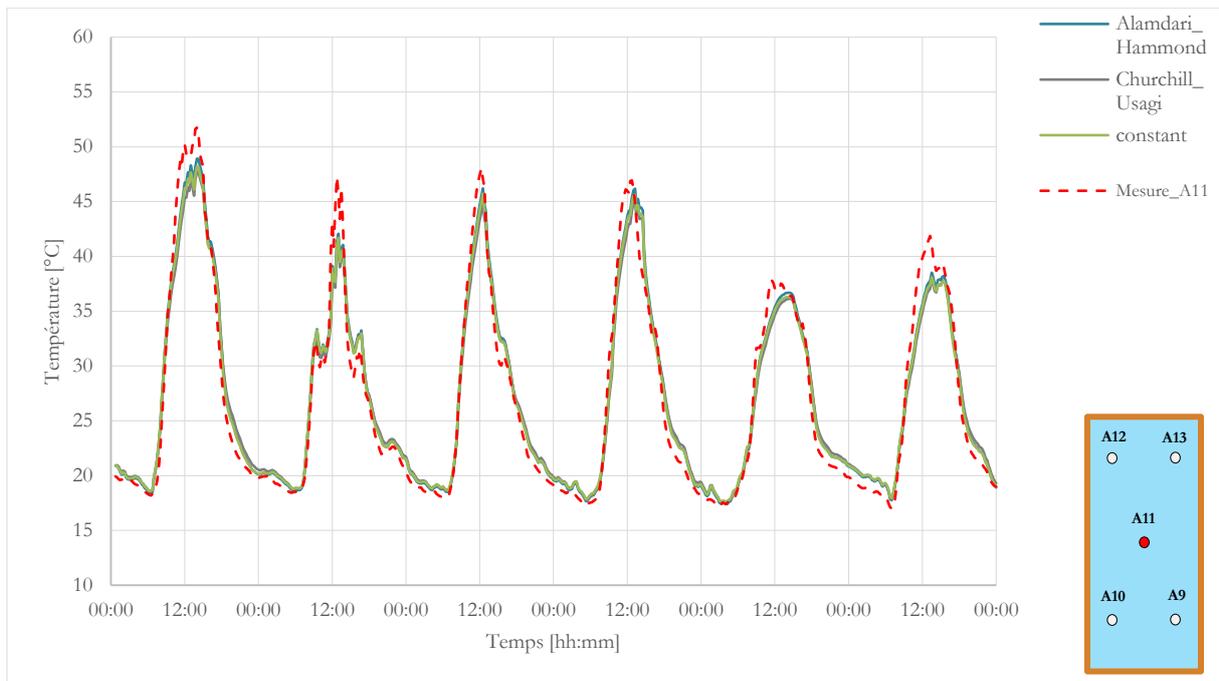


Figure 4-16 : Comparaison des profils de température entre les simulations pour différents modèles convectifs intérieurs et la mesure pour la position A11

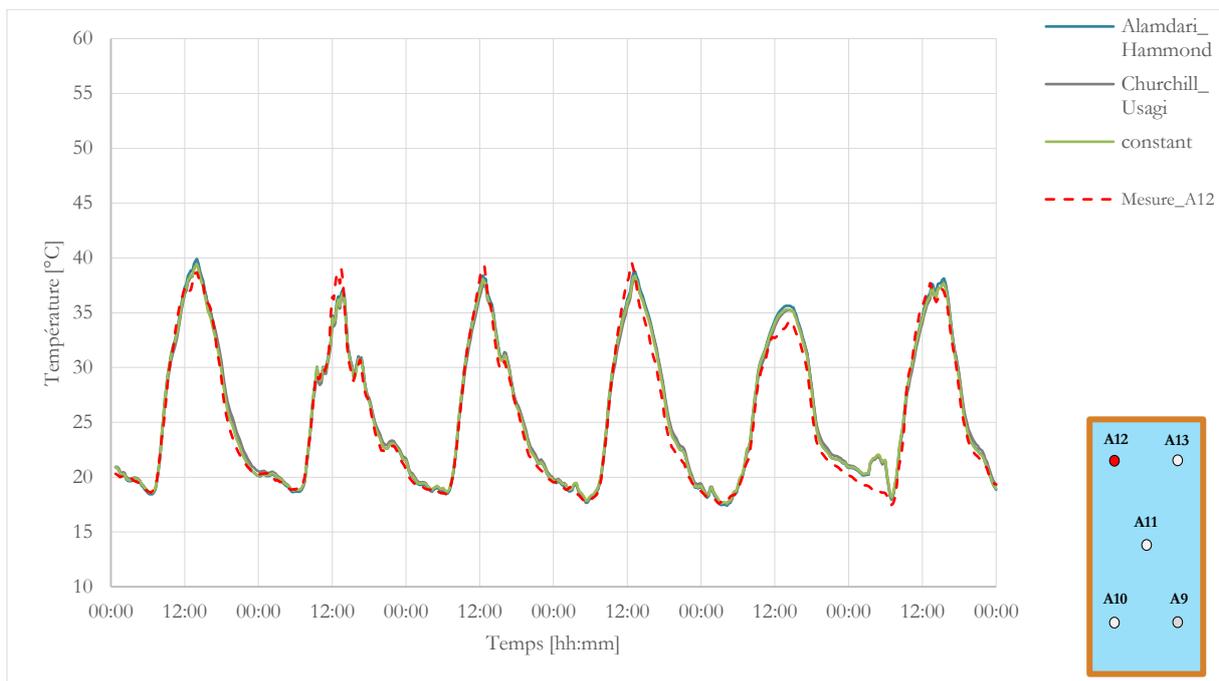


Figure 4-17 : Comparaison des profils de température entre les simulations pour différents modèles convectifs intérieurs et la mesure pour la position A12

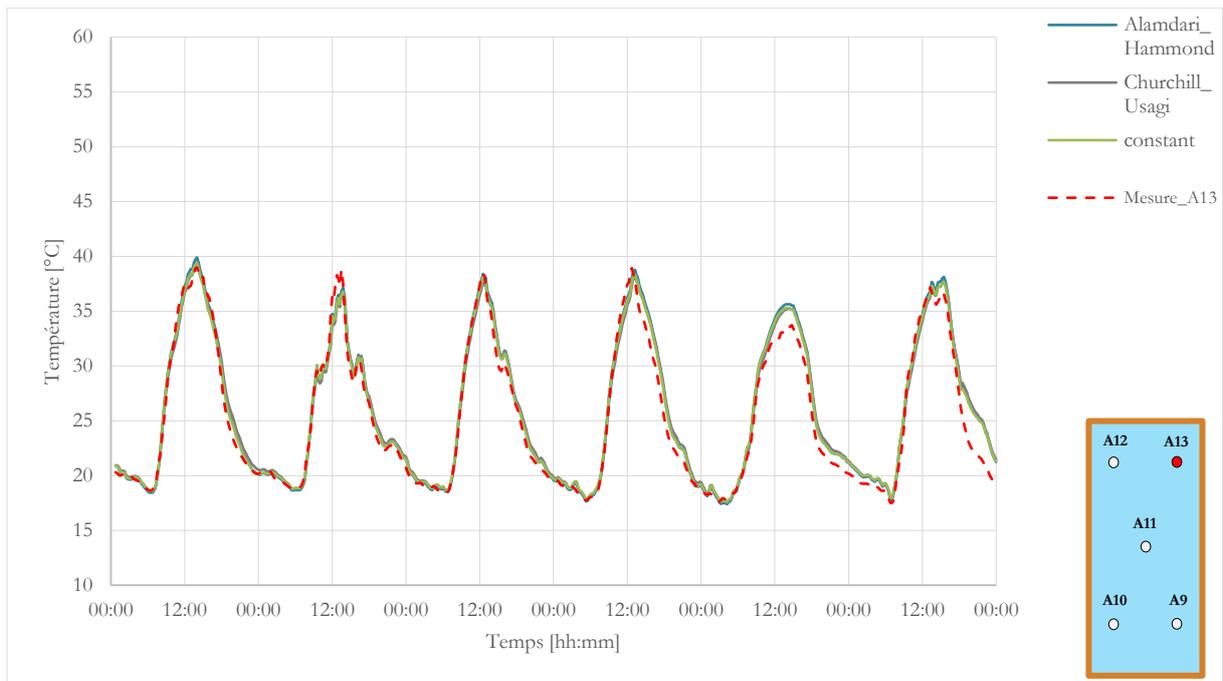


Figure 4-18 : Comparaison des profils de température entre les simulations pour différents modèles convectifs intérieurs et la mesure pour la position A13

Tableau 4-5 : Indicateurs de validation pour les différents modèles convectifs intérieurs pour chaque position

		MBE	RMSE	ψ [%]
Alamdari & Hammond	Position 9	-0.66	2.11	89.2
	Position 10	-0.38	2.08	89.5
	Position 11	-0.23	1.64	94.3
	Position 12	-0.46	0.95	97.6
	Position 13	-0.63	1.16	92.2
Churchill & Usagi	Position 9	-0.46	2.39	86.2
	Position 10	-0.18	2.43	87.5
	Position 11	-0.11	1.96	90.4
	Position 12	-0.44	1.05	96.2
	Position 13	-0.61	1.24	92.5
Constant ($h_{ce} = 4.09$)	Position 9	-0.55	2.13	88.9
	Position 10	-0.27	2.14	88.7
	Position 11	-0.13	1.70	93.6
	Position 12	-0.39	0.90	97.2
	Position 13	-0.57	1.08	95.1

A partir des courbes sur les Figure 4-14 à Figure 4-18, il est difficile de constater une différence notable entre les différents modèles de convection intérieure. A partir du Tableau 4-5 on observe que le modèle de Alamdari & Hammond (1983) et le modèle constant offrent de meilleurs résultats de validation mais que l'objectif n'est pas encore atteint pour toutes les positions sur le VTC.

Pour améliorer le modèle, nous allons effectuer une optimisation à partir de la corrélation de Alamdari & Hammond (1983) et ajuster les paramètres m et n dans l'équation (voir Equation. 21 dans le Chapitre 3 : Transfert par convection). Par principe de cohérence (comme pour la convection extérieure), nous allons effectuer le calcul séparément pour la surface exposée et celle ombragée. Nous cherchons là aussi à minimiser la somme des RMSE pour chaque position sur la surface du VTC avec la même méthode.

Voici donc, dans le Tableau 4-6, les résultats des coefficients m et n après optimisation.

Tableau 4-6 : Résultats pour les coefficients m et n après optimisation du modèle convectif

	Surface exposée	Surface ombragée
m	0.711	0.959
n	0.239	0.485

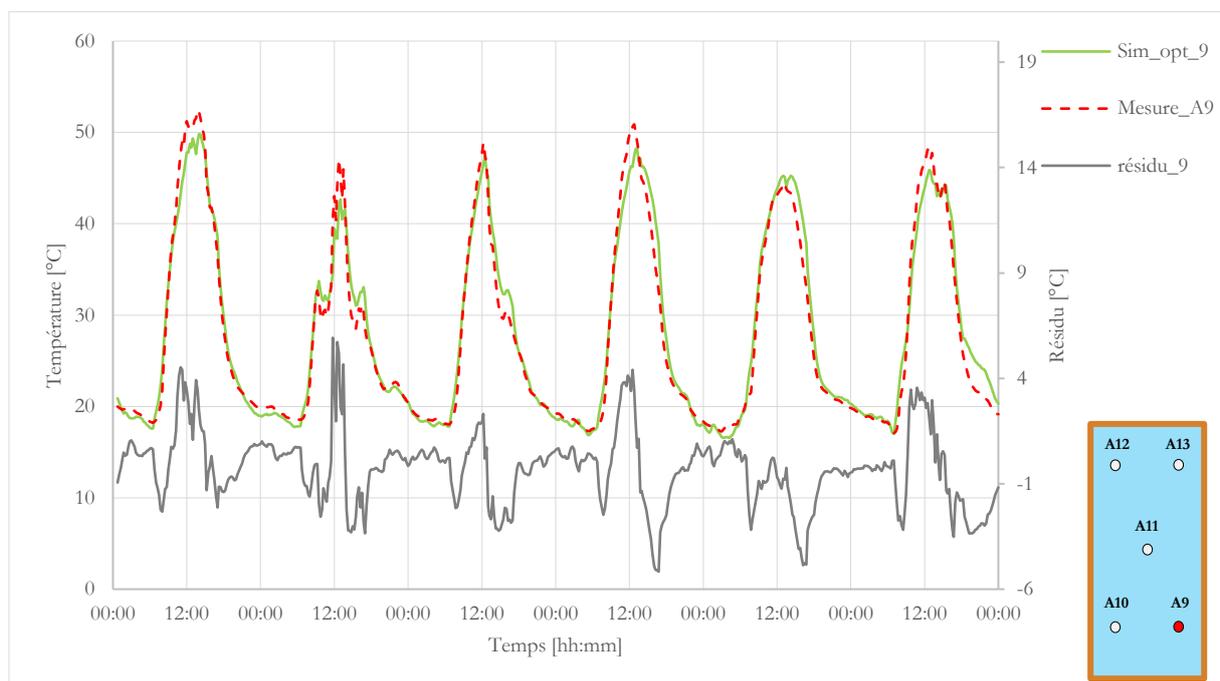


Figure 4-19 : Comparaison des profils de température entre la simulation pour le modèle convectif intérieur optimisé et la mesure pour la position A9

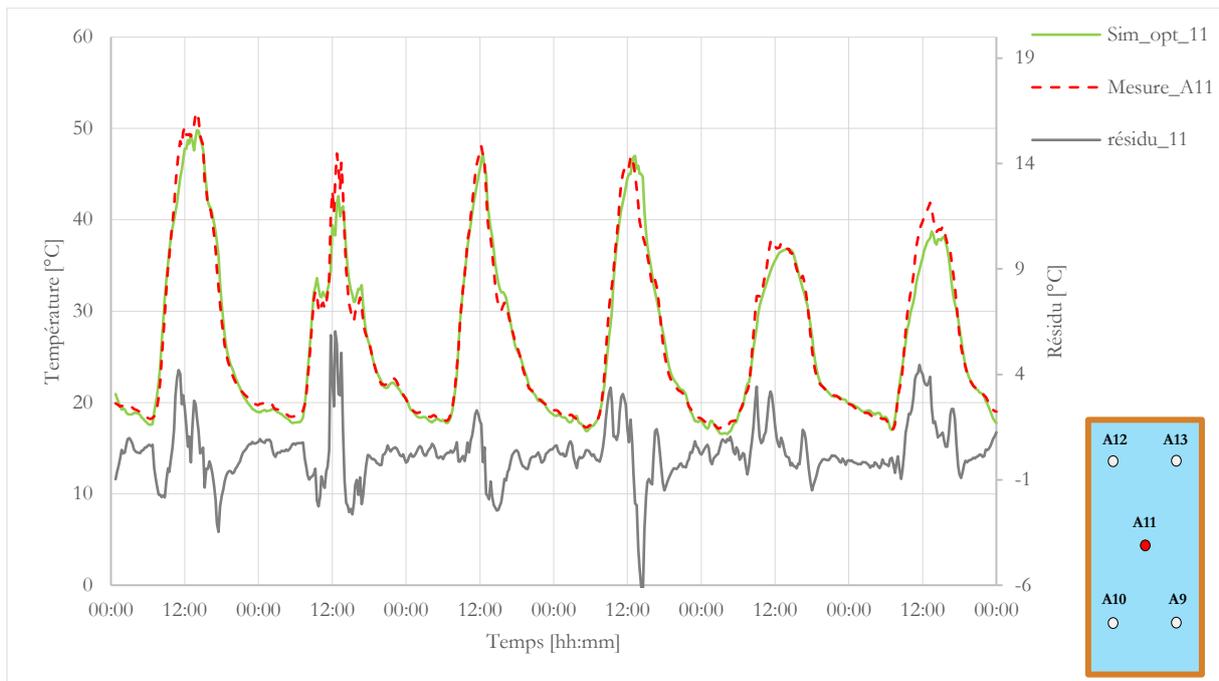


Figure 4-20 : Comparaison des profils de température entre la simulation pour le modèle convectif intérieur optimisé et la mesure pour la position A11

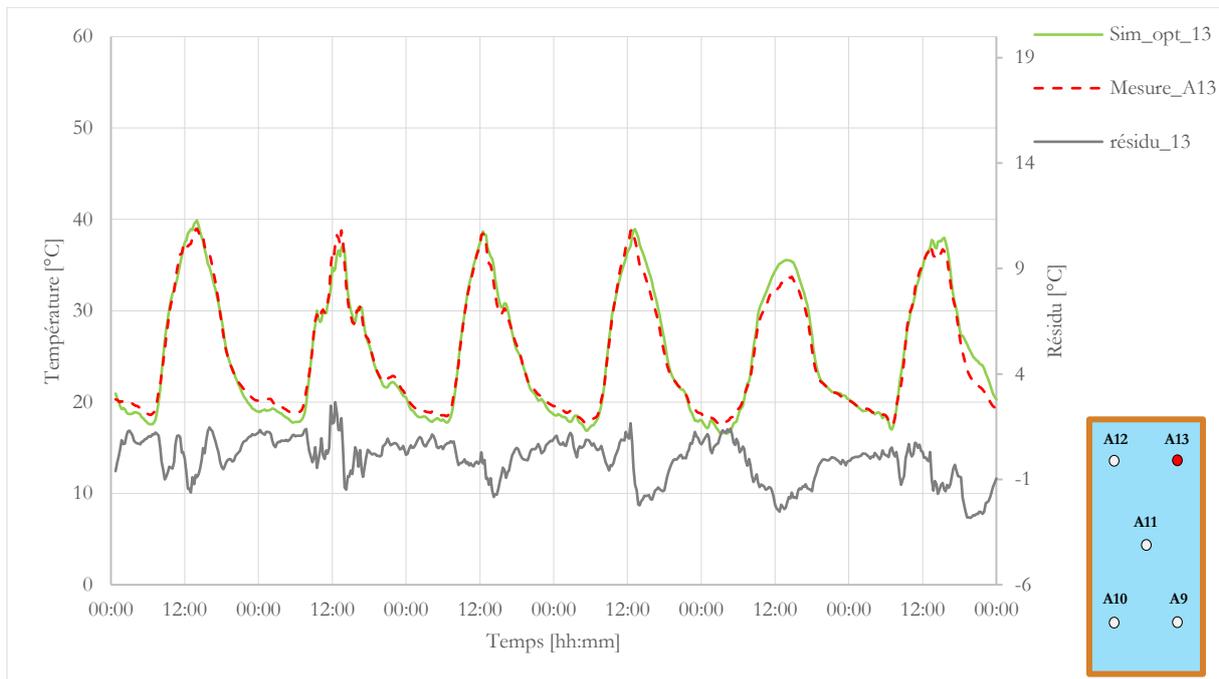


Figure 4-21 : Comparaison des profils de température entre la simulation pour le modèle convectif intérieur optimisé et la mesure pour la position A13

Tableau 4-7 : Résultats des indicateurs de validation après optimisation du modèle convectif intérieur

		MBE		RMSE		ψ [%]	
		Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Scénario h_{ci} optimisé	Position 9	-0.66	-0.29	2.11	1.77	89.2	94.6
	Position 10	-0.38	-0.003	2.08	1.74	89.5	92.7
	Position 11	-0.23	0.26	1.64	1.40	94.3	95.8
	Position 12	-0.46	0.15	0.95	0.89	97.6	98.4
	Position 13	-0.63	-0.03	1.16	1.02	92.2	95.5

De manière générale, et là encore, sur les Figure 4-19 à Figure 4-21, on constate peu de différence entre les courbes par rapport au scénario précédent avec la convection extérieure. On peut quand même souligner une diminution des résidus au niveau des pics de température atteints aux alentours de 12h00, comme par exemple pour la position 9. De plus, grâce au Tableau 4-7, on est capable de voir les améliorations des indicateurs de validation. Notamment on peut observer, pour chaque position sur le VTC, que $\psi \geq 90\%$. Cela veut dire que plus de 90% du temps, les points sont en dessous des 10% d'amplitude maximale. L'objectif de départ est atteint. A partir de ces résultats, le modèle 2D proposé dans cette thèse peut être considéré comme validé pour la série de mesure étudiée.

On remarque que la prédiction du modèle 2D s'est améliorée et arrive à mieux traduire le comportement thermique du VTC dans le cas de cette étude. Cela nous donne un aperçu de la précision et de la justesse du modèle. Tout cela nous permet avec plus de confiance de pouvoir utiliser le modèle pour d'autres périodes de l'année ou d'autres configurations de bâtiment.

Cependant, pour conclure cette partie, il est pertinent de se questionner sur les raisons pour lesquelles les modèles de la littérature classique ont échoué dans ce cas précis. Pour la convection extérieure, cela peut s'expliquer en partie par la mesure du vent utilisée ici, qui est celle de la station météo qui se trouve plusieurs mètres en arrière de la cellule LGI (voir schéma *Chapitre 2*). Ce capteur de vent se situe sur le mat à 10m de hauteur. Cela montre qu'on n'a pas une bonne connaissance des coefficients de pression sur la paroi concernée, ici le VTC. On peut aussi ajouter que cette mesure ne prend en compte qu'un sens de flux du vent. Une étude expérimentale spécifique est donc nécessaire pour retrouver la corrélation pour le modèle de convection extérieure et intérieure, en intégrant une meilleure prise en compte du phénomène thermique dû à la différence de température entre la surface du VTC et l'air extérieur ou intérieur.

4.3 VALIDATION GLOBALE DU MODELE

Maintenant que le modèle 2D a pu être validé, pour cette séquence expérimentale, nous passons à la validation du système global dans PITAYA. Ce système a été décrit dans le *Chapitre 3* et il est composé à la fois du modèle 2D, du couplage 1D/2D, et du module thermique et d'éclairage naturel.

4.3.1 Validation thermique globale

Tout d'abord, la validation thermique consistera principalement, à la confrontation des résultats de la simulation à la mesure de la température d'air pour la cellule LGI. Le but de cette validation est de montrer que l'assemblage de l'ensemble des modèles (1D/2D) fonctionne bien et que le système global donne des résultats satisfaisants. Tous les coefficients optimisés pour le VTC sont conservés lors de cette étude et les autres coefficients convectifs s'appliqueront uniquement aux autres parois.

La description et la composition des parois de la cellule LGI sont à retrouver au *Chapitre 2* et il est possible d'observer les propriétés thermiques associées à ces matériaux dans le Tableau 4-8.

Tableau 4-8 : Propriétés thermiques des matériaux composant les parois de la LGI

Matériaux	Epaisseur [m]	Conductivité thermique [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	Masse volumique [kg/m^3]	Chaleur spécifique [$J.K^{-1}.kg^{-1}$]
Fibrociment	0.005	0.65	1600	840
Polyuréthane	0.06	0.0237	30	1400
Béton	0.04	1.75	2100	653
Polystyrène	0.03	0.045	25	1380
Verre du VTC	0.012	0.798	840	2530

Dans cette simulation, les températures du sol et du faux plafond sont forcées. D'une part, il est trop complexe de simuler les transferts thermiques dans le sol (et les modèles existants ne sont pas encore suffisamment fiables), c'est pour cela qu'un thermocouple a été placé sous les dalles de béton du sol de la cellule. Ceci est une technique classique en physique du bâtiment (appelée forçage) qui permet de fixer cette température comme une condition aux limites du modèle et s'affranchir ainsi des erreurs liées à la modélisation du sol. D'autre part, la particularité de la cellule LGI est que sa toiture contient des matériaux à changement de phase, installés lors de la thèse de Guichard (2013) dans le laboratoire PIMENT. Similairement au sol, un thermocouple a été placé en sous face du faux plafond, au-dessus du polystyrène, en prévision du forçage pour les

simulations. On conserve les mêmes hypothèses sur le rayonnement GLO extérieur et intérieur que dans la validation 2D. Pour la convection extérieure, la valeur du coefficient utilisé est $h_{ce} = 11.7 W.K^{-1}.m^{-2}$. Cette valeur est issue de la littérature et elle fixé pour pouvoir faire la confrontation des premiers résultats. Si les critères de validation ne sont pas satisfaits à l'issues de l'étude, nous reviendrons sur cette valeur pour l'optimiser.

C'est pour cela que nous allons tout d'abord, optimiser les valeurs de convection intérieure. Nous avons utilisé les coefficients constants selon le type de paroi pour une première confrontation des résultats avec la mesure de la température d'air intérieur. A partir des premiers résultats, nous avons ajusté les coefficients pour satisfaire les critères de validation et atteindre un scénario optimal. Les résultats des coefficients avant et après optimisation sont dans le Tableau 4-9. Sur la Figure 4-22 et Figure 4-23, on peut observer les premiers résultats avant optimisation et les résultats avec les coefficients optimisés, respectivement.

Tableau 4-9 : Résultats des coefficients convectifs intérieurs avant et après optimisation

	Coefficient convectif intérieur h_{ci} [$W.m^{-2}.K$]	
	Avant optimisation	Après optimisation
Sol	1	11.13
Plafond	6.1	1.284
Paroi verticale (sauf VTC)	4.09	14.96

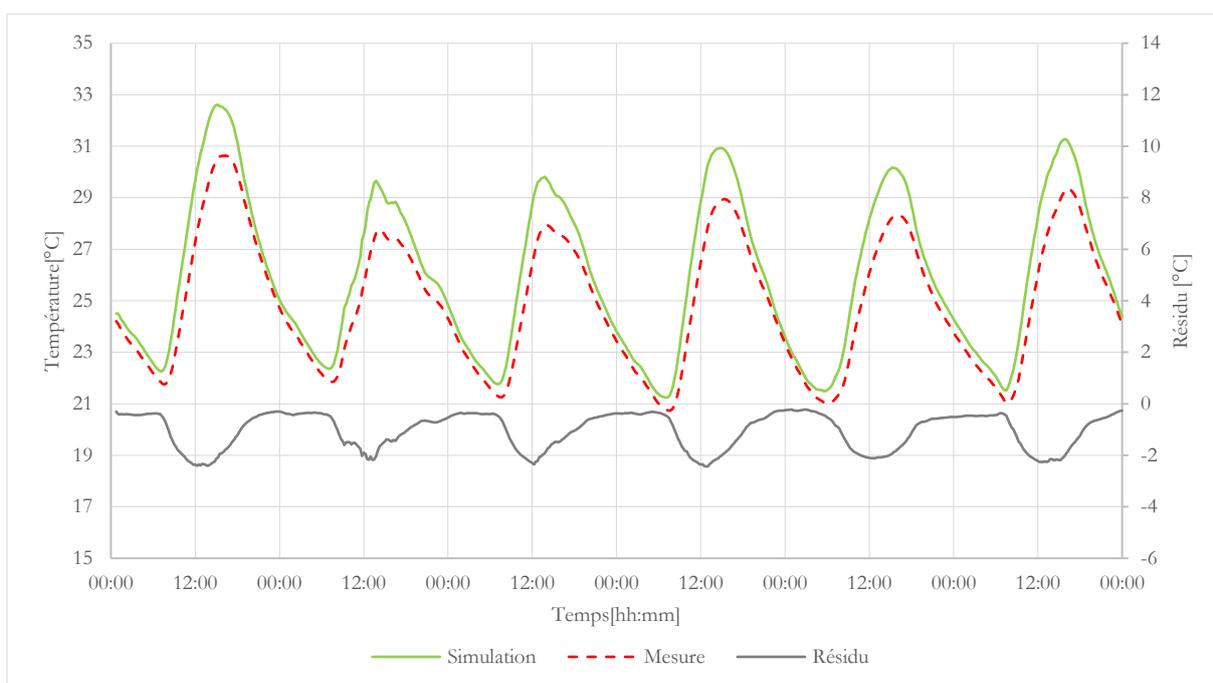


Figure 4-22 : Comparaison des profils de température d'air intérieur entre la simulation et la mesure avant optimisation

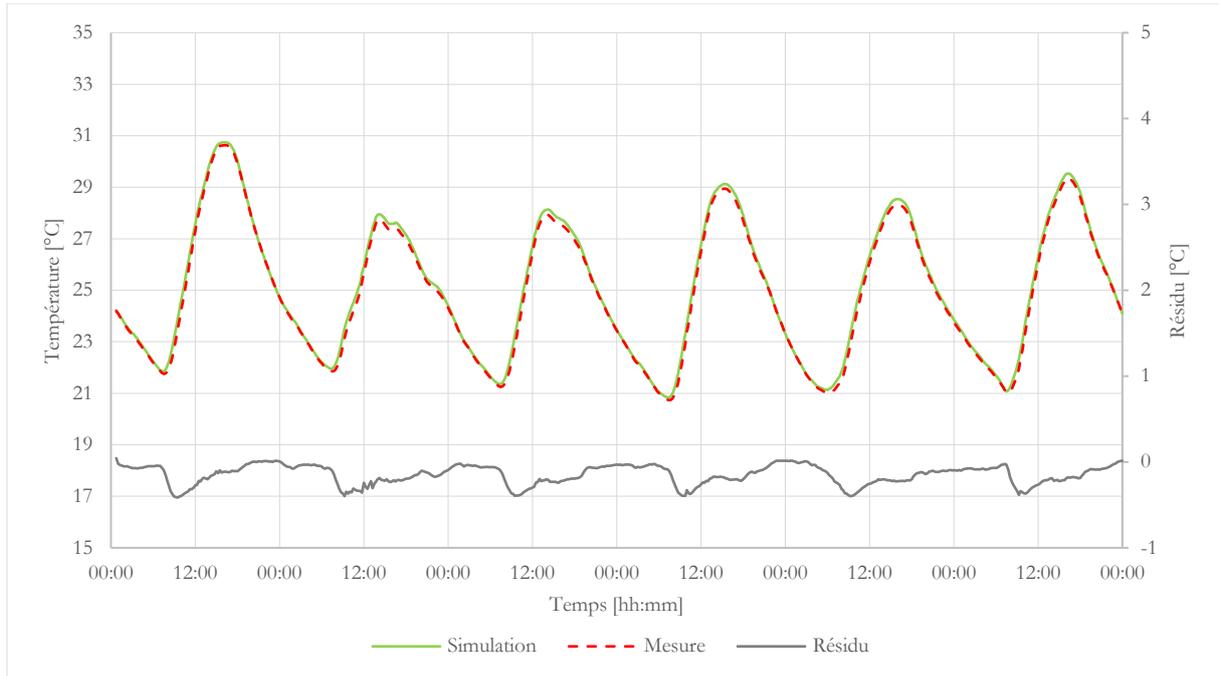


Figure 4-23 : Comparaison des profils de température d'air intérieur entre la simulation et la mesure après optimisation

Tableau 4-10 : Résultats des indicateurs de validation avant et après optimisation

	MBE	RMSE	ψ [%]
Avant optimisation	-1.046	1.26	57.0
Après optimisation	-0.127	0.15	100

En comparant visuellement, les profils de température sur les Figure 4-22 et Figure 4-23, on peut observer l'amélioration due à l'optimisation des coefficients convectifs. En effet, on constate une quasi-coïncidence entre la courbe simulée et la mesure, avec un résidu qui varie entre $+0.05^{\circ}\text{C}$ et -0.4°C , sur toute la séquence étudiée. Ce qui est en dessous de la marge d'erreur du capteur et des instruments de mesure. Dans le Tableau 4-10, on remarque le critère de validation, ψ , passe de 57% avant à 100% du temps après optimisation.

Pour conclure, le système global thermique satisfait les critères de validation. Le modèle intégré dans PITAYA est capable de représenter le comportement thermique en deux dimensions d'un vitrage thermochrome et de la température d'air de la cellule LGI lorsqu'il est correctement couplé au modèle nodal du bâtiment. On peut maintenant passer à l'étude de la validation de l'éclairage naturel.

4.3.2 Validation en éclairage naturel

Avant de commencer la validation du modèle d'éclairage naturel implémenté dans PITAYA, nous allons ajuster les paramètres optiques du vitrage par rapport au modèle de la fonction de contrôle décrit dans le *Chapitre 3* et ensuite présenter les hypothèses de simulation.

Comme pour les paramètres solaires, tous les paramètres visibles sont déjà connus et fournis par le fabricant via la base de données, sauf un seul paramètre, qui est à ajuster dans ce cas : il s'agit du coefficient de pente, c (Tableau 4-11). A partir de ces paramètres nous allons pouvoir implémenter l'équation de la fonction de contrôle concernant la transmittance visible du VTC.

Tableau 4-11 : Paramètres de la fonction de contrôle pour la transmittance visible après ajustement par régression logistique

	Max	Min	Température de transition	Coefficient de pente (après ajustement)	R ²
Transmittance	0.607	0.035	45.8	0.07137	0.9982

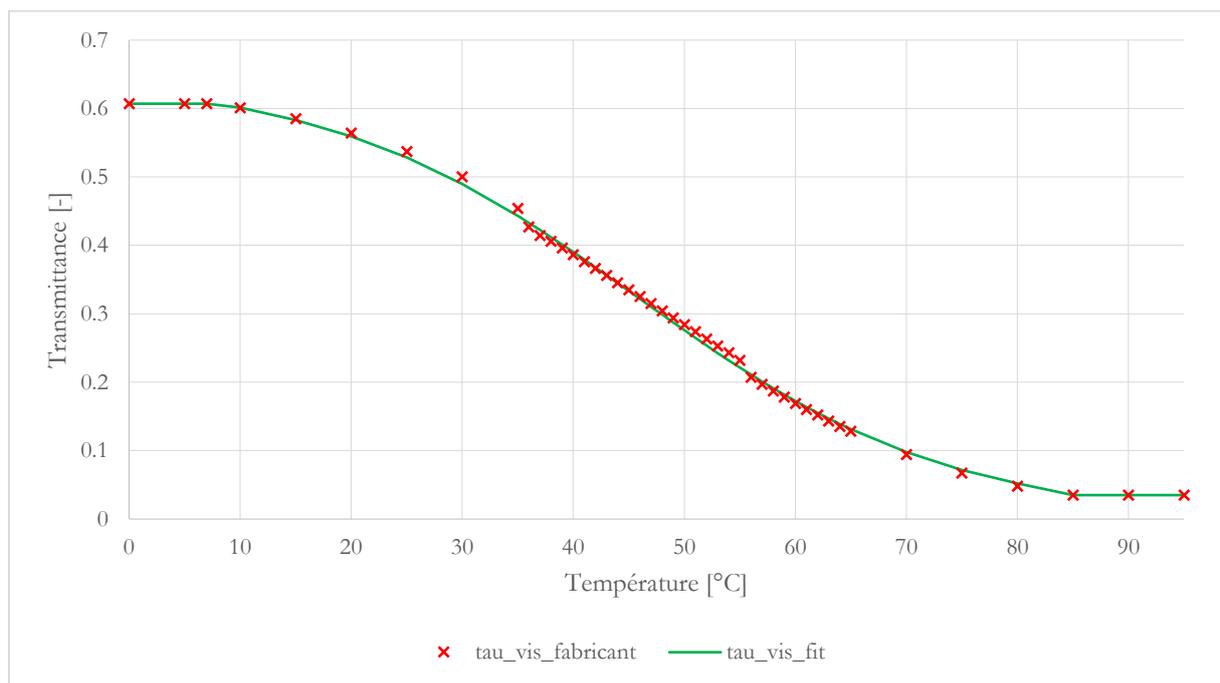


Figure 4-24 : Transmittance visible avec régression logistique

Sur la Figure 4-24, on observe qu'à partir des données fournies par le fabricant, la courbe de la transmittance est bien ajustée (avec un R² proche de 1).

La séquence du 25 au 29 septembre 2018 a été choisie. Cette période est similaire que pour les parties précédentes sauf que les données du 24 septembre ne sont pas incluses dans l'analyse car elles sont manquantes. On observe sur la Figure 4-25, le profil de l'éclairage global et diffus.

On constate que l'éclairement global atteint 120 klux aux alentours de 12h00. Le pas de temps est de 15min, comme pour la thermique, et le pas d'espace est de 50cm sur x et y , comme le maillage des luxmètres installés dans la LGI.

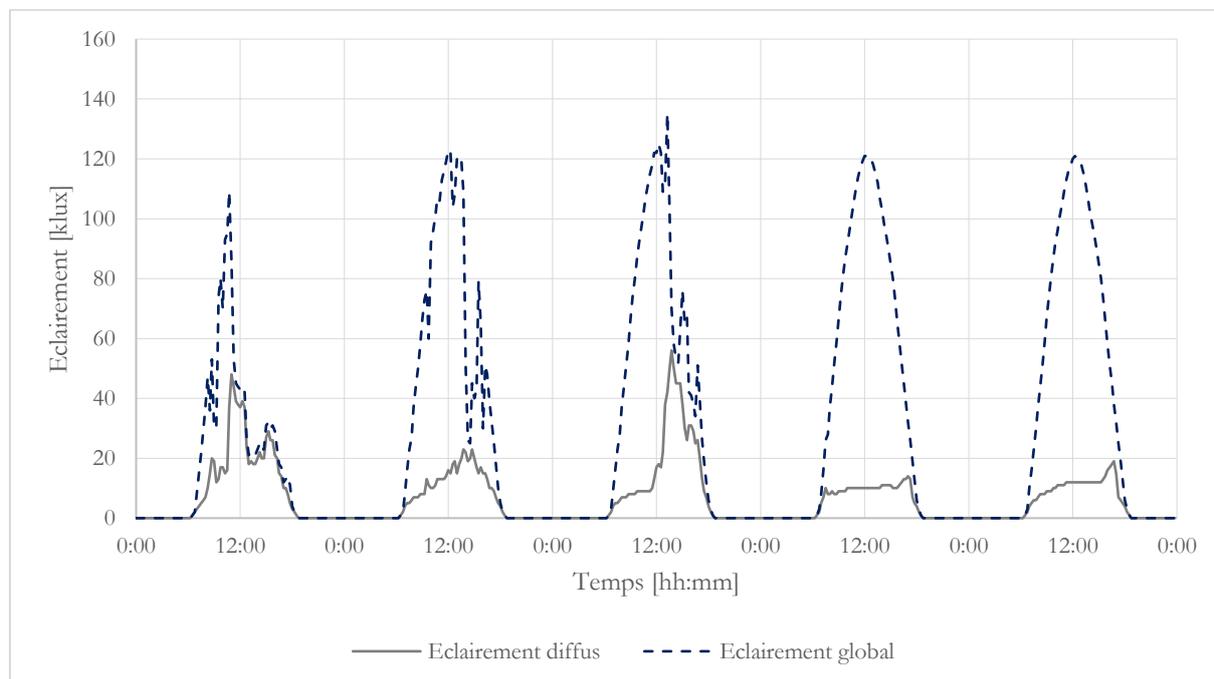


Figure 4-25 : Eclairement lumineux diffus et global sur un plan horizontal pour la séquence du 25 au 29 septembre 2018

Les propriétés d'absorptance et réflectance visibles des parois sont dans le Tableau 4-12.

Tableau 4-12 : Propriétés d'absorptance et de réflectance visible des parois opaque

Parois	Absorptance	Réflectance
Sol	0.3	0.7
Murs	0.3	0.7
Plafond	0.75	0.35

Les indicateurs choisis pour la validation sont le MBE et le RMSE comme pour la thermique. De plus nous allons ajouter un indicateur pour vérifier la précision du modèle. En effet, nous allons définir un indicateur de pourcentage du temps où les valeurs simulées se trouvent dans un fuseau de tolérance autour des valeurs mesurées. Comme décrit dans la thèse de Malet-Damour (2015), on choisira donc une valeur de $\pm 10\%$, ce qui correspond à la précision des luxmètres utilisés lors de la campagne de mesure.

Au stade de cette étude, il n'y a pas de paramètres à optimiser pour améliorer les résultats de simulation de modèle et satisfaire les indicateurs de validation.

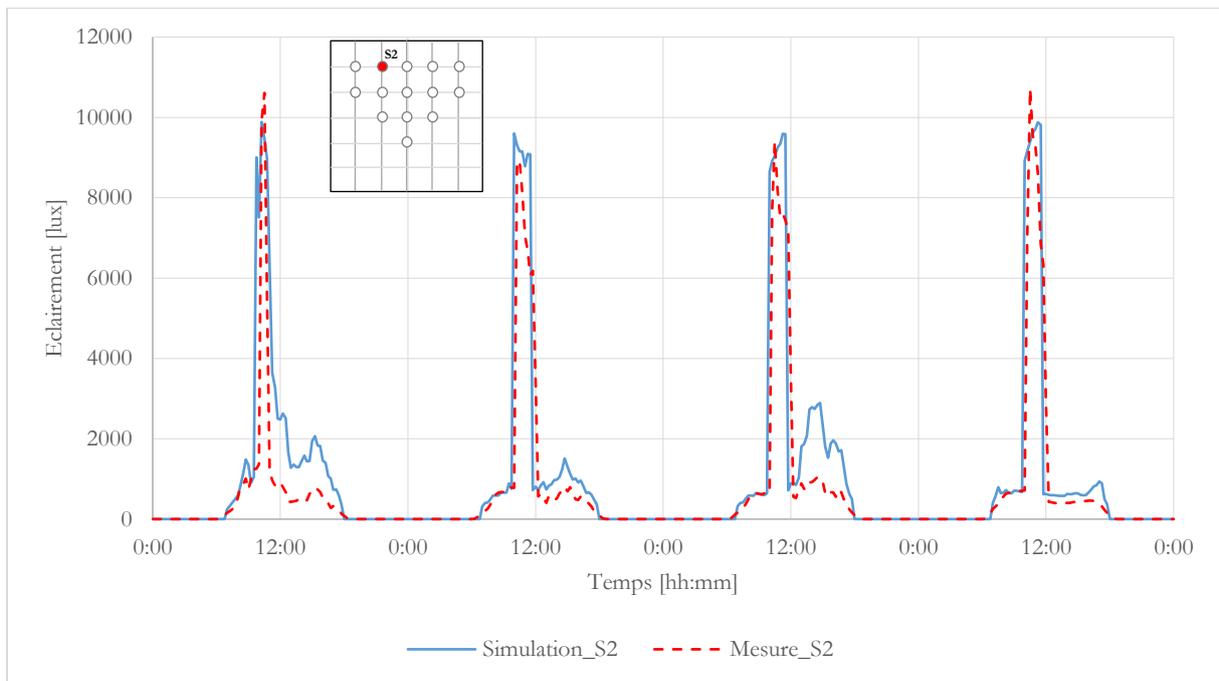


Figure 4-26 : Comparaison des profils d'éclairage simulé et mesuré pour la position S2

Sur la Figure 4-27, Nous pouvons constater que le profil d'éclairage simulé pour la position A2 suit la tendance de celui mesuré au moment de la tâche solaire aux alentours de 10h30 (valeurs maximales). Cependant, au niveau de la partie diffuse, en deuxième partie de la journée, la simulation surestime les valeurs par rapport à la mesure.

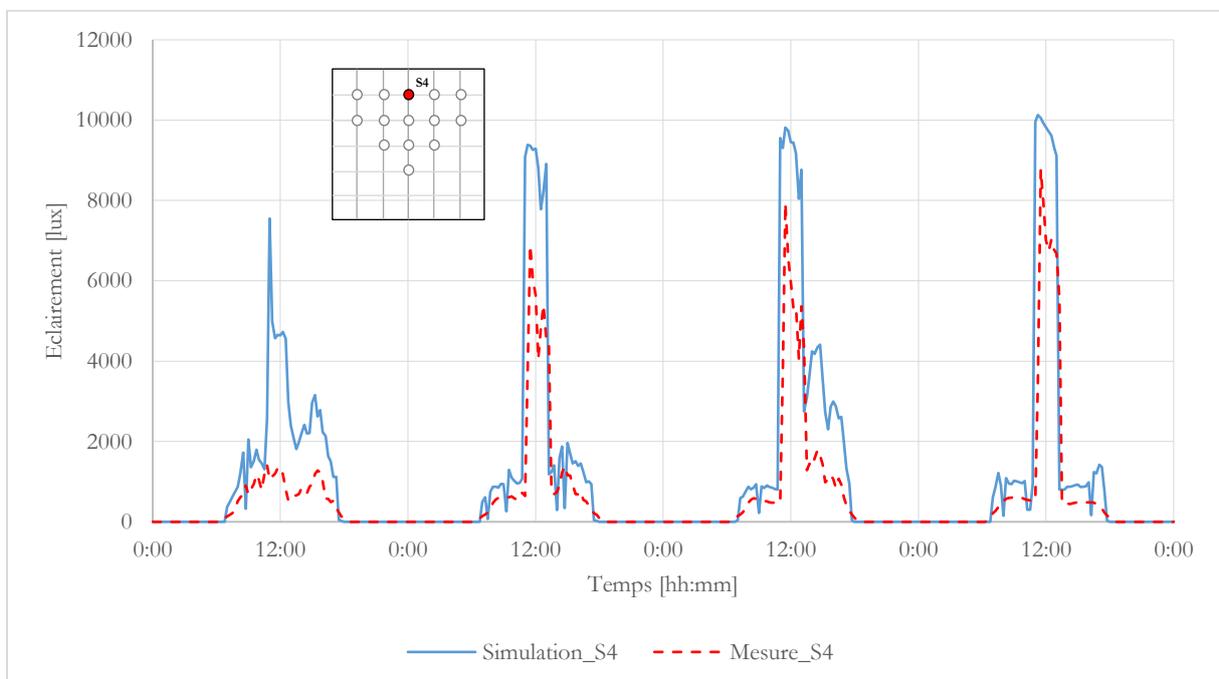


Figure 4-27 : Comparaison des profils d'éclairage simulé et mesuré pour la position S4

Sur la Figure 4-27, Nous observons que pour le premier jour le profil d'éclairage simulé ne suit pas le profil mesuré. En effet, nous sommes en présence d'un ciel partiellement nuageux ce qui

cause des perturbations dans le modèle. Pour les jours suivants, le profil simulé surestime le profil mesuré en présence de la tâche solaire.

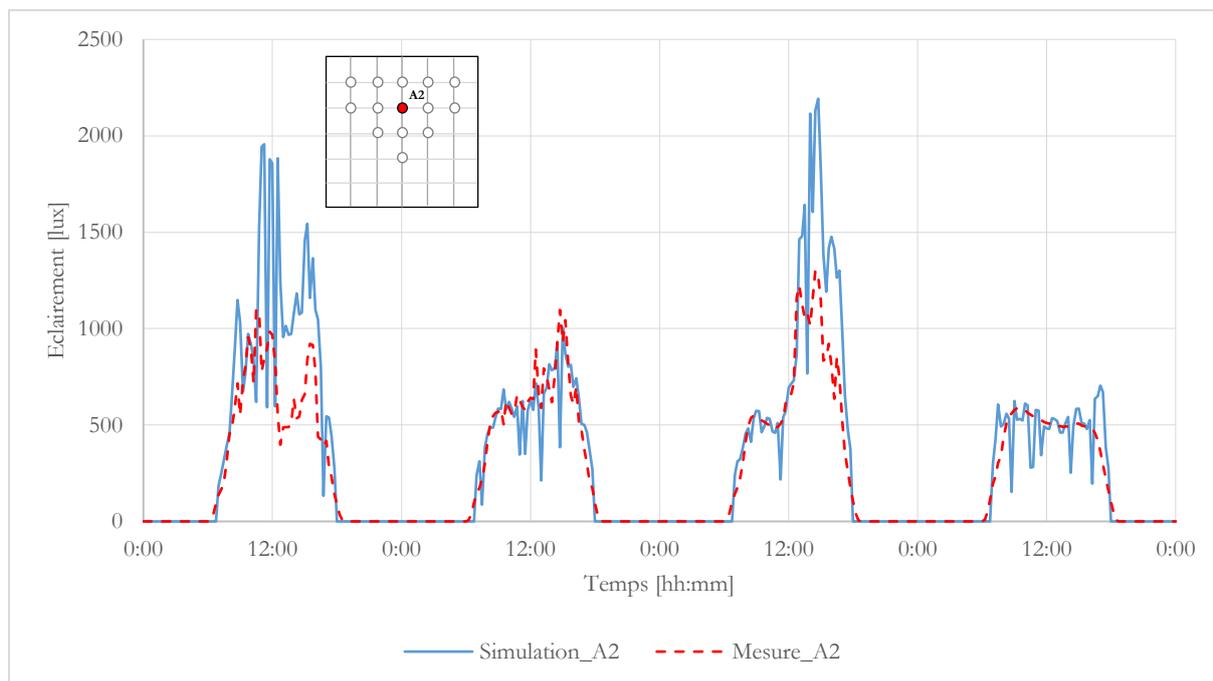


Figure 4-28 : Comparaison des profils d'éclaircement simulé et mesuré pour la position A2

Nous constatons, sur la Figure 4-28, que pour le jour 2 et le jour 4, le profil simulé traduit mieux la dynamique de l'éclaircement au sein de la pièce alors que pour les autres jours il surestime les valeurs.

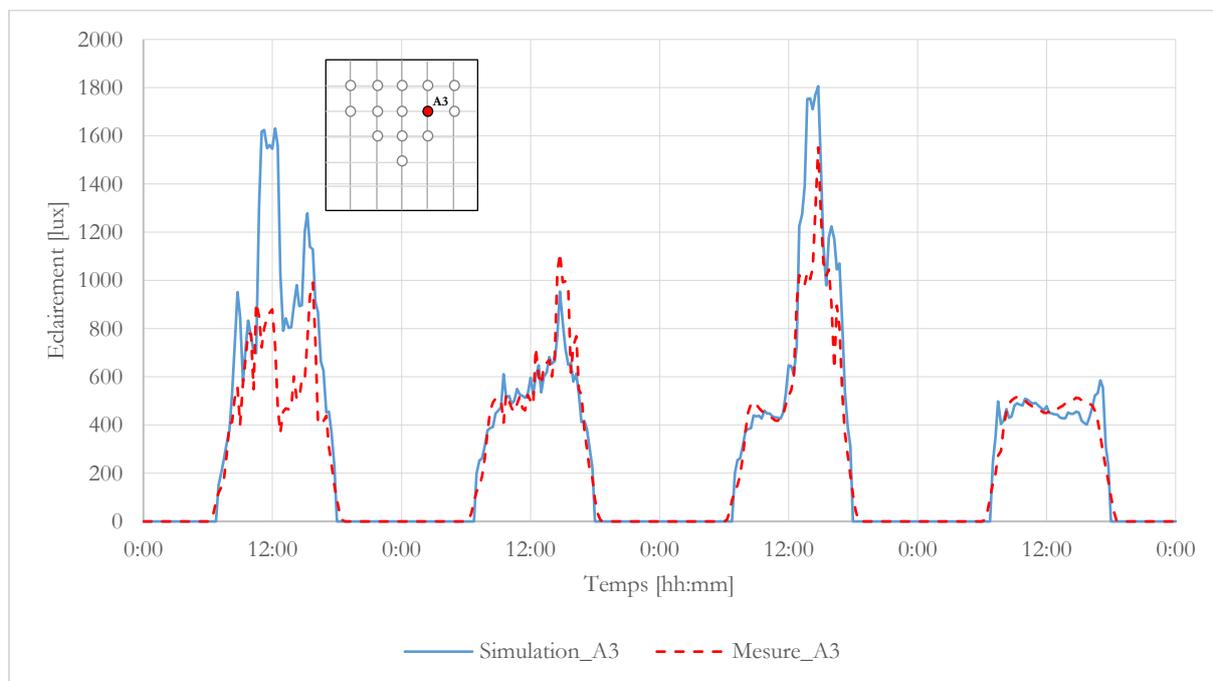


Figure 4-29 : Comparaison des profils d'éclaircement simulé et mesuré pour la position A3

Sur la Figure 4-29, les résultats simulés sont proches de la mesure pour la position A3, sauf pour le jour 1, où les conditions de diffus extérieurs variables.

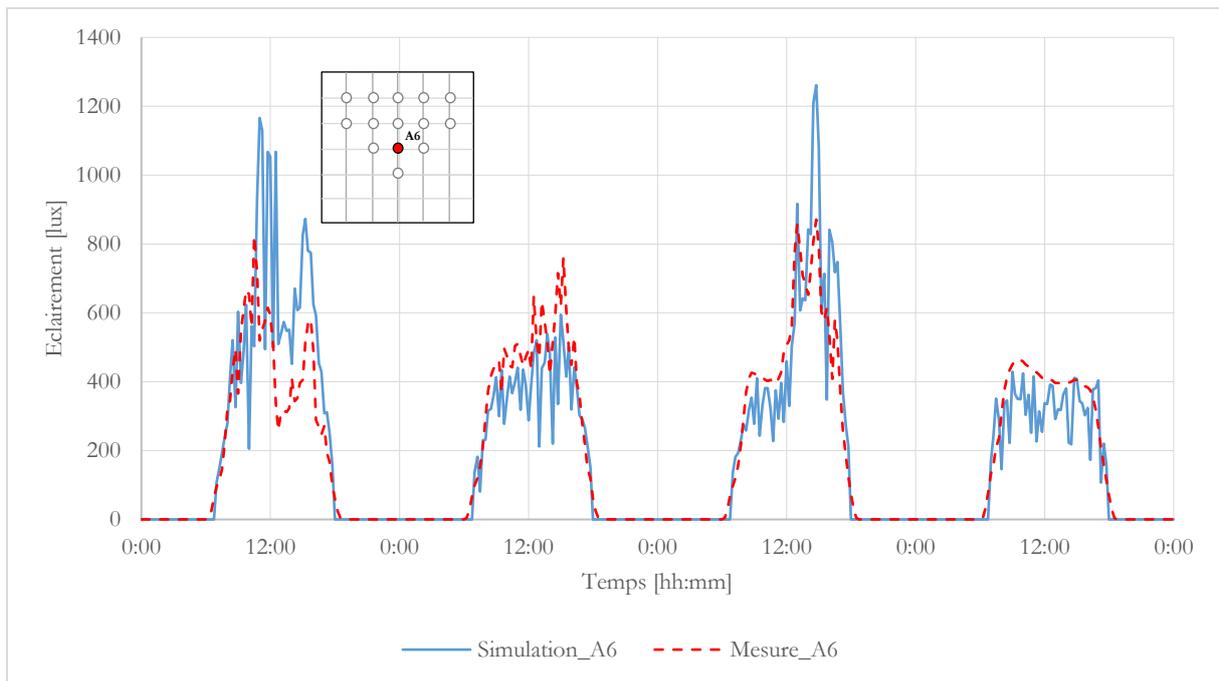


Figure 4-30 : Comparaison des profils d'éclaircement simulé et mesuré pour la position A6

Sur la Figure 4-30, là aussi, nous avons le profil simulé qui suit la tendance de l'éclaircement mesuré pour la position A6. La simulation a surestimé les valeurs extrêmes des pics aux alentours de 11h15 pour le jour 1 et de 14h30 pour le jour2. Il est à noter que pour le jour 4 la simulation sous-estime les valeurs.

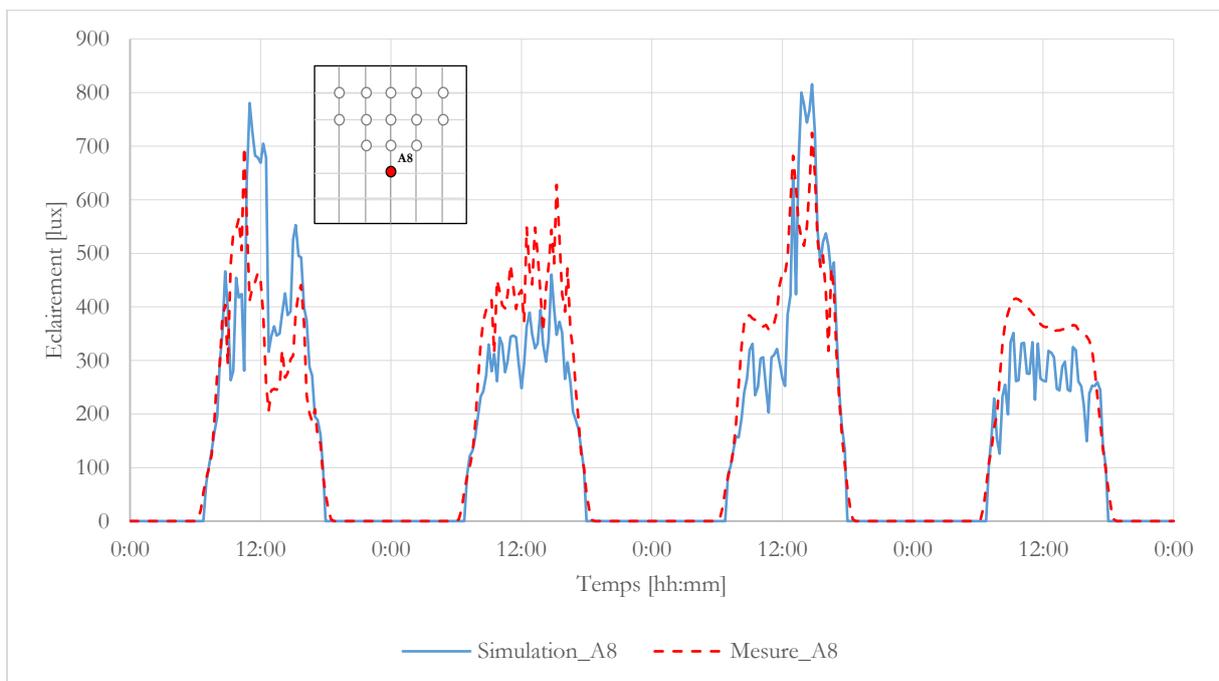


Figure 4-31 : Comparaison des profils d'éclaircement simulé et mesuré pour la position A8

Nous remarquons, sur la Figure 4-31, la simulation sous-estime la mesure pour la position A8, sauf pour certains pics aux alentours de 12h15 pour le jour 1 et de 14h30 pour le jour 3.

Tableau 4-13 : Résultats des indicateurs de validation pour l'éclairage pour chaque position du plan utile

	MBE	RMSE	%fuseau
A0	-38.0	155.6	11.5
A1	-79.8	232.0	13.1
A2	-62.6	235.0	15.4
A3	-51.9	176.7	17.2
A4	-17.2	123.2	14.2
A5	-14.3	123.0	8.5
A6	-1.6	122.7	9.4
A7	-9.0	104.5	13.5
A8	16.2	86.6	8.0
S0	-71.6	696.8	10.1
S1	-400.8	1294.2	2.8
S2	-268.0	1194.9	7.1
S3	-0.6	1082.1	6.4
S4	-548.0	1396.2	0.5

Globalement, de la Figure 4-26 à la Figure 4-31, on peut constater que le modèle arrive à représenter la dynamique de l'éclairage des points mesurés sur le plan utile dans la pièce. Néanmoins, au regard des indicateurs de validation dans le Tableau 4-13, on peut voir que dans le cas de cette étude le modèle n'est pas suffisamment précis.

En effet, la valeur du %fuseau varie entre 0.5 et 17.2%. Le modèle, a plutôt tendance à surestimer les valeurs pour les positions à l'avant (plus proche du vitrage) et sous-estime les valeurs au fur et à mesure qu'on s'éloigne du VTC. De plus en présence de la tache solaire, comme sur la Figure 4-27, nous observons que le modèle surestime à chaque les valeurs par rapport à celles de la mesure. Cela peut s'expliquer par le fait que les luxmètres sont limités par une plage d'indication avec une valeur limite haute. Cela empêche et limite donc les luxmètres d'atteindre ces valeurs dans la dynamique de l'éclairage au sein de la LGI.

En présence uniquement d'éclairage diffus, le modèle à plutôt tendance à sous-estimer la valeur de l'éclairage mesurée. Plusieurs raisons peuvent venir expliquer ces phénomènes, comme la mauvaise prise en compte de l'albédo moyen extérieur ou les masques lointains. En effet, la LGI est entourée par le bâtiment de restauration du CROUS au nord-est, ainsi qu'un bâtiment de logement universitaire en R+4 qui était en construction au moment des mesures et de la végétation au nord-ouest. Tout cela vient perturber la prédiction de l'éclairage diffus au sein de la LGI. De plus, la prise du diffus dans le modèle d'éclairage se fait par la méthode du calcul du FLJ. Cette méthode est simplifiée et limite donc la prise en compte d'un environnement complexe.

Pour conclure sur cette partie, on remarque que la difficulté de la prise en compte des caractéristiques de l'environnement extérieur et la fiabilité de la mesure rendent complexe la simulation photométrique de cette cellule. Cela explique pourquoi le modèle mis en place ne représente pas au plus juste la réalité. De plus, le modèle d'éclairage naturel proposé, Split-flux, considéré comme simplifié, fonctionne mieux dans un environnement dégagé avec peu de complexités géométriques intérieures et extérieures. Il est presque impossible de prendre en compte avec précision tous ces paramètres d'environnement à moins de changer l'approche de la méthode ou d'utiliser des modèles numériques, comme ceux à lancer de rayon. En effet, par exemple, avec le modèle de lancer de rayons, il serait possible de décrire avec précision, le dôme du ciel et l'environnement proche et lointain. C'est-à-dire que l'environnement avoisinant la LGI, serait discrétisée en facettes avec des caractéristique d'absorptance et de réflectance différentes selon les données de départ. A partir de ça, il est possible de lancer des rayons avec la méthode 'avant' ou 'arrière' et ainsi prendre en compte avec précision les rayons directionnels de l'éclairage direct et les rayons diffus (dans toutes les directions, en demi-sphère). L'inconvénient de ce genre de modèle c'est le temps de mise en place de l'environnement et le temps de calcul qui est grand devant le modèle proposé dans cette thèse.

Néanmoins, ce modèle Split-flux a déjà été validé par Fakra (2009) sur la LGI, mais dans des conditions plus propice avec un environnement dégagé de tout obstacle.

On peut ajouter qu'une étude supplémentaire est nécessaire pour l'amélioration du modèle avec une meilleure description de l'environnement extérieur ou la mise en place d'un autre banc sur un site plus dégagé ou dans un environnement contrôlé.

4.4 APPLICATION DU MODELE

Finalement, nous allons effectuer une étude de simulation comparative entre PITAYA et EnergyPlus (DOE, 2010), uniquement sur la partie thermique. L'approche de la modélisation du comportement du VTC dans EnergyPlus est différente de celle de PITAYA. Une description détaillée du modèle VTC d'EnergyPlus a été faite dans le *Chapitre 1*.

Nous allons donc simuler la LGI avec les deux codes de calculs et ainsi comparer les résultats sur la journée du 1^{er} octobre 2018. Les mêmes paramètres et propriétés ont été utilisée pour effectuer ces simulations. La différence est la fonction de contrôle d'absorptance et de transmittance implémentée et décrite dans EnergyPlus. Nous pouvons voir sur la Figure 4-32, la courbe d'absorptance en fonction de la température avec les deux méthodes différentes.

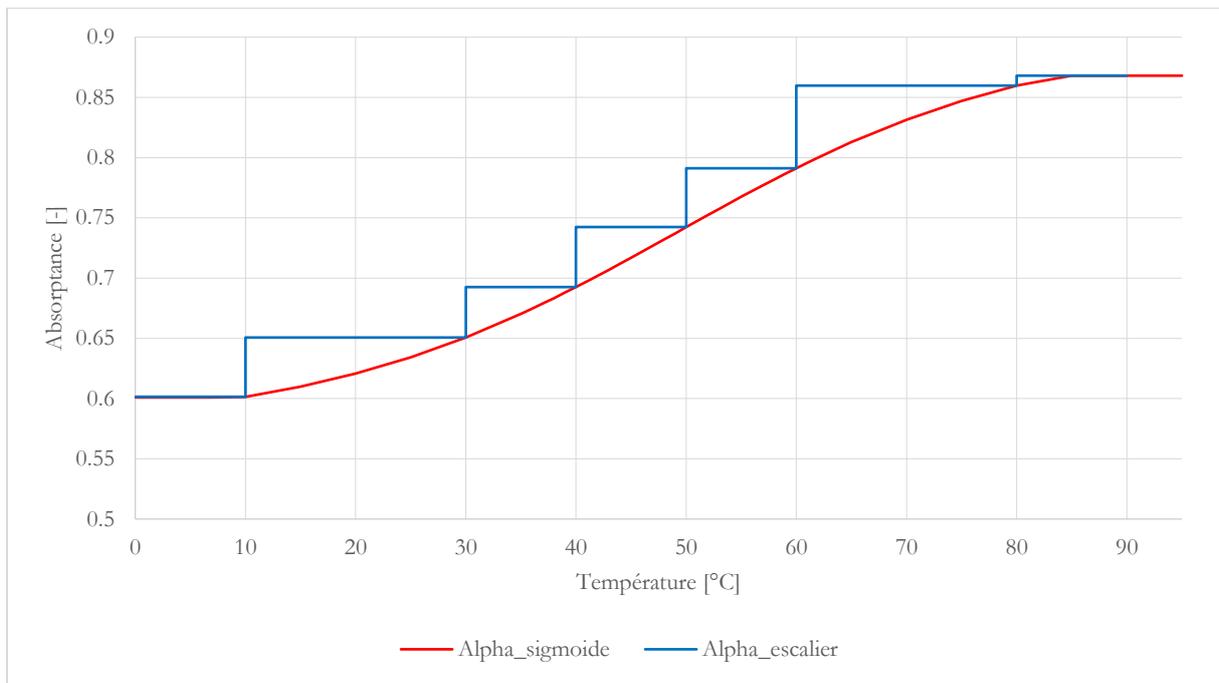


Figure 4-32 : Fonction de contrôle d'absorbance implémentée avec la méthode en escalier dans EnergyPlus et la sigmoïde dans PITAYA

Sur la Figure 4-33, on constate que, globalement, EnergyPlus a tendance à surestimer la température d'air intérieur. Le profil de température d'air simulé par EnergyPlus varie entre 22°C et 29°C alors que le profil de PITAYA varie entre 21°C et 27°C. L'écart maximal entre les deux courbes culmine à environ 3.5°C aux alentours de 12h.

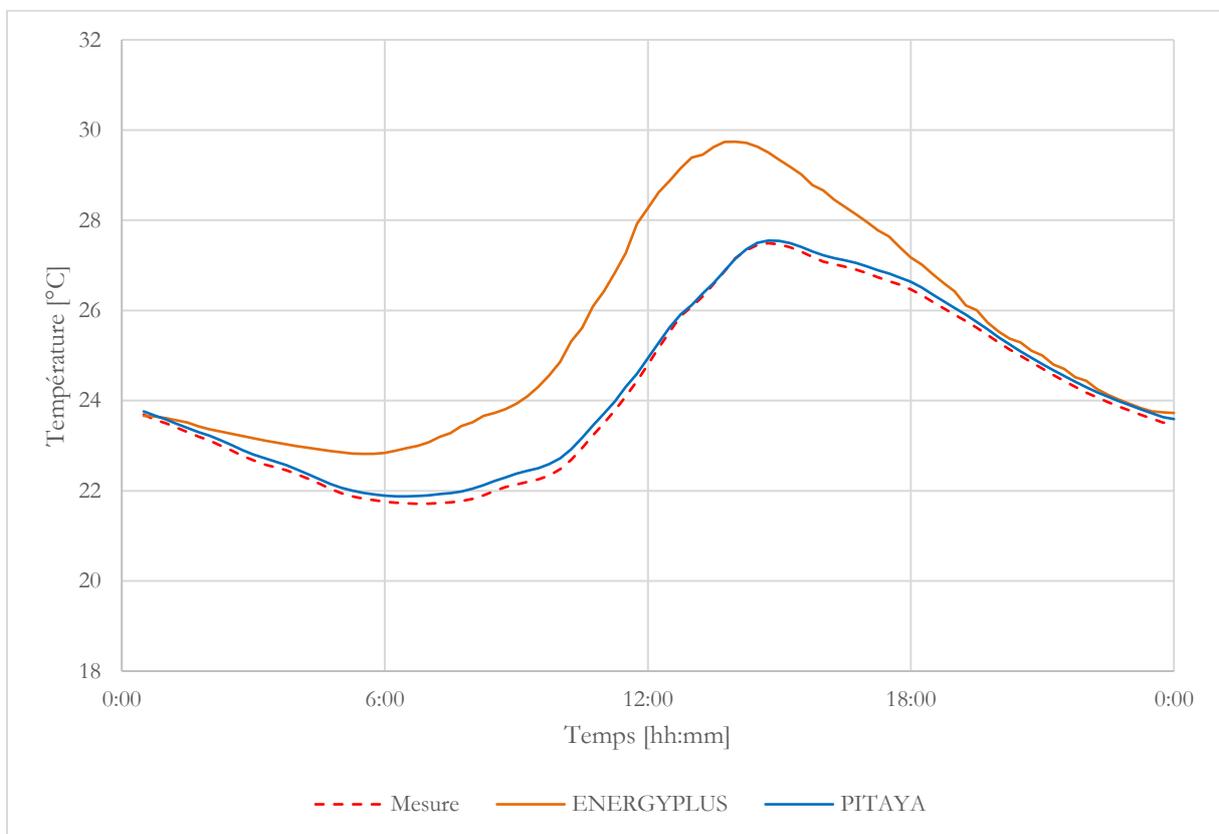


Figure 4-33 : Résultats du profil de température d'air intérieur pour EnergyPlus et PITAYA

Cela s'explique en partie par le fait que EnergyPlus fait une mauvaise prédiction sur la surface du VTC. En effet, la méthode appliquée par le logiciel est de calculer à chaque pas de temps la répartition solaire sur le vitrage en prenant en compte le masque et ensuite de déterminer un facteur solaire moyen à appliquer sur le seul et unique nœud de température contrairement à PITAYA. Le modèle 2D proposé dans cette thèse est capable de mieux prédire la répartition du rayonnement solaire ainsi que le champ de température sur l'ensemble du VTC (pour chaque nœud de température sur le maillage).

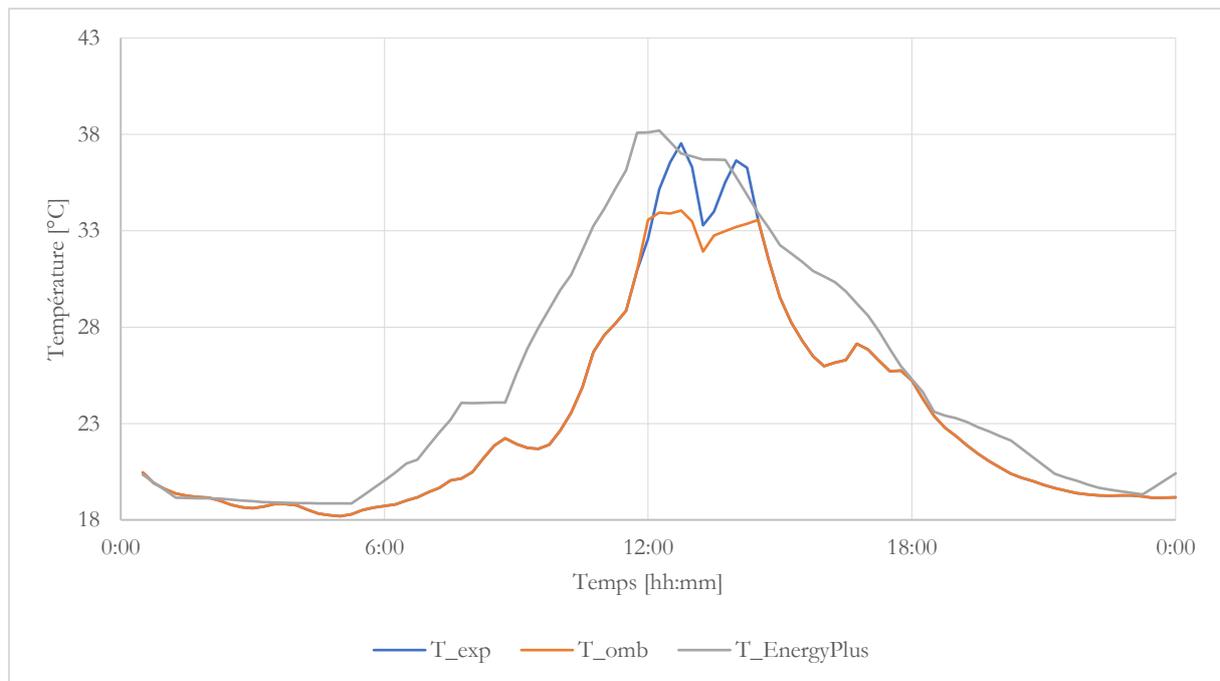


Figure 4-34 : Profil de température pour la surface exposée et ombragée dans PITAYA, et la température dans EnergyPlus

Une autre raison est que le modèle utilisé pour la fonction de contrôle, ou le modèle de la variation des propriétés thermo-optiques, dans EnergyPlus est en forme d'escalier, c'est-à-dire une fonction constante par morceaux et discontinue. Cette méthode en « escalier » présente de nombreux désavantages en plus de ne pas représenter la réalité physique de la fonction de contrôle, elle permet une absorption et une transmission du rayonnement solaire plus importante sur une plage de température plus grande comme on peut le voir sur la Figure 4-32. Cela entraîne et accélère « l'effet boule de neige » : où l'augmentation de l'absorptance fait augmenter la température qui à son tour élève l'absorptance et ainsi de suite. Cela peut entraîner une augmentation plus rapide de la température de surface du VTC (Figure 4-34). De plus dans PITAYA, grâce aux maillages sur la surface du VTC il est possible d'effectuer le bilan thermique sur tous les nœuds et de mieux prendre en compte la répartition hétérogène du rayonnement solaire et du champ de température, ce qui n'est pas le cas dans EnergyPlus. Cela dépend bien sûr, de la façon de décrire le VTC dans EnergyPlus et des connaissances de l'utilisateur. Dans cette étude de simulation, la fonction de contrôle implémenté dans EnergyPlus a été décrit avec 7 paliers différents, ce qui reste très détaillée en comparaison avec la majorité des études de simulations dans la littérature, où seulement 3 paliers sont utilisés en général (Saeli et al., 2010). Cela démontre l'impact que les connaissances de l'utilisateur sur les propriétés peuvent avoir sur la sortie de la simulation.

Il est aussi à noter que d'autres sources d'écarts peuvent intervenir lors de cette simulation, mais que c'est l'impact de la différence dans la modélisation du comportement du VTC dans PITAYA et EnergyPlus qui est significatif. Pour aller plus loin, il serait intéressant d'effectuer une étude approfondie sur une séquence plus longue et de pouvoir identifier avec plus de précision les sources d'erreurs et de différences potentielles.

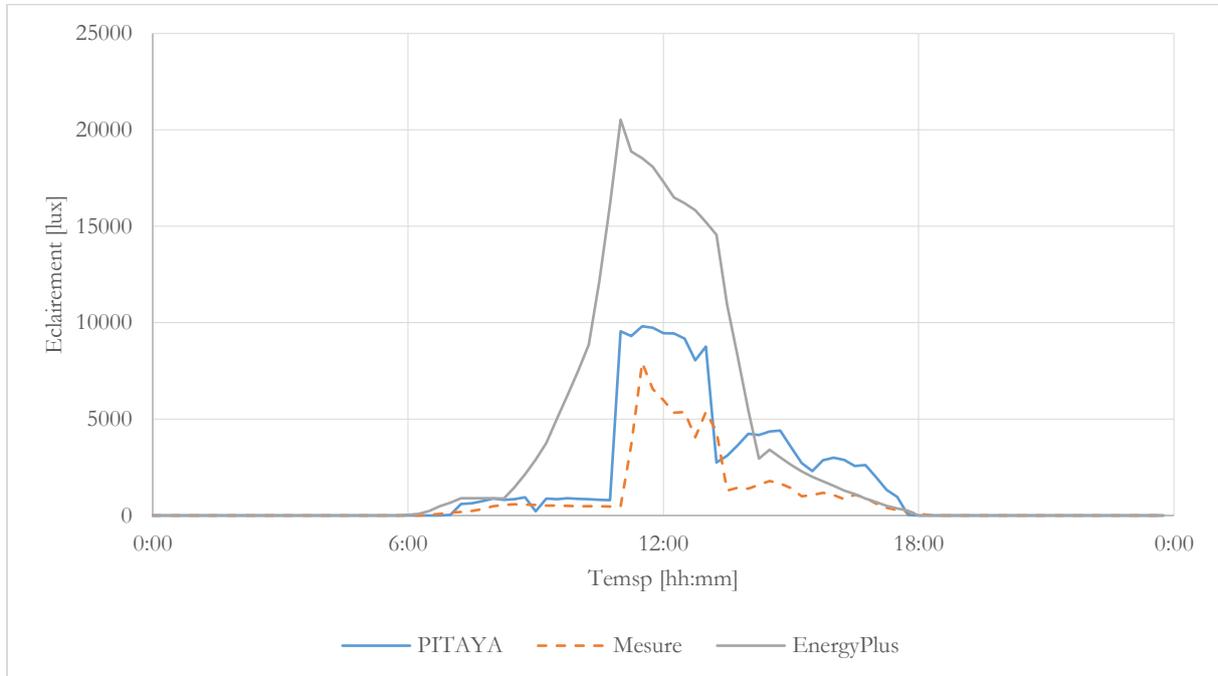


Figure 4-35 : Profil d'éclairement de PITAYA, d'EnergyPlus et de la mesure pour la position S4

Sur la Figure 4-35, nous pouvons observer le profil d'éclairement pour la position S4 de PITAYA, d'EnergyPlus et de la mesure. Cette position a été choisie car elle est concernée par la tâche solaire lors de cette journée. Globalement EnergyPlus, surestime largement le mesure tout au long de la journée et surtout au pic de l'éclairement. En effet, le profil d'EnergyPlus culmine à plus de 20 000 lux alors que le mesure à 7924 lux. Il est aussi possible de remarquer que PITAYA approche mieux le profil d'éclairement mesuré mais reste tout même supérieure. Les mêmes modèles d'éclairement sont utilisés dans PITAYA et EnergyPlus. Cependant, ce dernier, utilise une méthode d'efficacité lumineuse à partir du rayonnement solaire thermique extérieur pour retrouver l'éclairement global et diffus. Ce type de méthode n'est pas calibrée pour les milieux tropicaux (Fakra, 2009) et rend les prédictions peu fiables, où les valeurs sont dans la grande majorité des cas surestimées (Malet-Damour, 2015).

4.5 CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous avons apporté des éléments de validation au modèle proposé lors de cette thèse. L'objectif principal était de valider le modèle en deux dimensions sur la surface du VTC.

Tout d'abord, nous avons retrouvé par régression logistique la fonction de contrôle qui permet de calculer la transmittance et l'absorptance solaire à partir des données du fabricant. A partir de ça, nous avons mis en place une étude de validation avec des indicateurs statistiques. Une première confrontation des résultats simulés avec la mesure montre déjà plusieurs disparités dans la dynamique et la tendance des profils de température pour plusieurs modèles convectifs différents. Lors de cette première phase, il a été mis en évidence le besoin d'ajuster et d'optimiser les coefficients convectifs extérieurs et intérieurs. Ensuite après optimisation, les résultats des indicateurs de validation sur le modèle 2D ont montré que les objectifs fixés ont été atteints. Le modèle arrive à prédire avec fiabilité et précision le comportement thermique du VTC. Il arrive donc à calculer la répartition du rayonnement solaire et le champ de température associé avec précision, en prenant en compte les masques proches. Le modèle arrive à mettre en évidence la surface exposée, en position haute et la surface ombragée en position basse, et ainsi le champ de température hétérogène du VTC. Cette hétérogénéité avait été constatée lors de la phase expérimentale, à la fois par la mesure de la température mais aussi visuellement.

Par la suite, nous avons validé le système thermique global. Après ajustement des coefficients convectifs intérieurs, les résultats statistiques montrent une prédiction de la simulation par rapport à la mesure d'une précision suffisante. Graphiquement, une homothétie quasi parfaite a été observée pour la prédiction de la température d'air intérieur du bâtiment.

De plus, nous avons cherché à valider le modèle photométrique, en commençant par retrouver l'équation de la fonction de contrôle pour la transmittance visible. Nous avons pu ensuite avoir les résultats de la simulation sur la séquence étudiée. Les premiers résultats ont montré que le modèle arrive à reproduire la tendance générale de l'éclairement au sein de la pièce pour chaque position sur le plan utile. Néanmoins, le niveau de fiabilité et de précision est faible, prouvé par les résultats des indicateurs statistiques. Il y a ici, encore une marge d'amélioration possible afin de renforcer la fiabilité des prédictions en photométrie.

Pour finir, une application du système global thermique a été effectuée en comparant les résultats de simulation pour une journée entre EnergyPlus et PITAYA. Les résultats ont montré pour cette journée qu'EnergyPlus surestime la température d'air par rapport à PITAYA et que cela vient de la mauvaise prise en compte du champ température hétérogène du VTC, et la description en « escalier » de la fonction de contrôle. Cette étude de simulation comparative confirme nos choix et décisions pris lors de cette thèse pour améliorer le modèle de comportement du vitrage thermochrome.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSIONS

Ces travaux ont eu pour objet l'étude et la modélisation du comportement du vitrage thermochrome (VTC) soumis au rayonnement solaire en physique du bâtiment.

Dans un premier temps, lors de la revue bibliographique, nous avons vu l'intérêt du vitrage thermochrome (VTC) pour l'efficacité énergétique des bâtiments. L'analyse des modèles des codes existants a mis en évidence le besoin de proposer un modèle qui prend en compte la répartition hétérogène du champ de température et qui intègre une fonction de contrôle en forme de sigmoïde.

Dans un deuxième temps, à travers une expérimentation, unique pour une zone tropicale, sur une cellule test in situ à échelle 1 équipée d'un VTC sur la surface Nord, nous avons pu observer que les valeurs de température mesurées sont élevées par rapport aux autres parois. De plus le profil de température du VTC suit la tendance du rayonnement solaire. Nous pouvons aussi ajouter qu'il existe un écart de température entre les capteurs en position haute et basse. Cet écart est dû à la présence du débord de toiture créant ainsi un masque et une répartition hétérogène du rayonnement solaire sur le VTC.

Dans un troisième temps, un nouveau modèle de fonction de contrôle du type « sigmoïde » a été proposé pour améliorer la prise en compte de la variation des propriétés thermo-optiques du VTC, plus proche des résultats de mesures trouvés dans la littérature en chimie des matériaux. De plus, un modèle thermique 2D du comportement du VTC a été mis en place. Ce modèle a la capacité de prendre en compte finement les masques pour calculer la répartition du rayonnement solaire. Ainsi, le modèle arrive à prédire le champ de température hétérogène sur la surface du VTC. Le modèle 2D a été couplé à un système global de bâtiment en thermique et en photométrie. Cette prise en compte en 2D du champ de température sur un VTC et le couplage sont aussi des apports majeurs et originaux de cette thèse.

Dans un quatrième temps, il a été retrouvé par régression logistique les fonctions de contrôle de l'absorptance et de la transmittance. Des éléments de validation ont été apportés sur le modèle thermique 2D. Les résultats statistiques liés ont montré de bonnes fiabilités et précision du nouveau modèle proposé sur le champ de température de surface du VTC. Il a donc été conclu que dans notre cas le modèle 2D thermique a été validé. Dans l'étape suivante, le système global a aussi été validé. En effet, les résultats en thermique ont montré une grande précision par rapport à la mesure de l'air intérieur dans la LGI. D'un autre côté, les résultats photométriques arrivent à reproduire la tendance générale de l'éclairement au sein de la pièce pour chaque position sur le plan utile. Néanmoins, le niveau de fiabilité et de précision est faible, prouvé par les indicateurs statistiques. Le besoin d'une approche différente sur la description de l'environnement extérieur ou de

changement de type de modélisation est donc nécessaire pour l'amélioration des modèles. Finalement, une étude de simulation comparative a été effectuée entre EnergyPlus et PITAYA. Les résultats ont montré que EnergyPlus surestime la température d'air intérieur par rapport à PITAYA. Les différences entre les deux modèles sont jugées responsables de cet écart. La conclusion de cette étude comparative confirme les objectifs et choix de départ pour l'amélioration du modèle de comportement du VTC.

PERSPECTIVES

Sur le court terme, il est important de pouvoir intégrer le nouveau modèle thermique 2D validé dans Codyrun. Ces travaux peuvent s'effectuer rapidement et accroître le niveau de fiabilité de l'ensemble du système global (modèle 2D + système 1D). Il faudra appliquer un processus de validation similaire et tester sur plusieurs séquences représentatives des saisons et des positions du soleil par rapport au VTC. Ensuite, des travaux à mener sur l'hystérésis seront nécessaires pour améliorer le modèle de comportement du VTC. Il faudra lancer des campagnes de mesure sur échantillon pour pouvoir caractériser les propriétés thermo-optiques en fonction de la température, puis intégrer les données d'hystérésis dans le modèle et le valider.

Sur le moyen terme, il est important de pouvoir effectuer la mesure et la caractérisation précise de la corrélation de convection extérieure et intérieure sur la LGI pour améliorer la validité du modèle 2D. De plus, il serait intéressant d'ajouter une campagne de mesure à échelle réduite en proposant différentes configurations avec vitrage clair, différents VTC et d'autres vitrages performants. Le but étant de pouvoir comparer les résultats et définir des configurations idéales pour les milieux tropicaux. Il est aussi à noter qu'une étude supplémentaire à échelle 1 ou à échelle réduite en photométrie est nécessaire pour pouvoir améliorer et fiabiliser le modèle, avec des capteurs plus adaptés aux plages de mesures de l'éclairement de la tâche solaire.

Sur le long terme, nous pourrions proposer une étude expérimentale complète en ajoutant une analyse visuelle aux résultats. C'est-à-dire installer une première caméra pour suivre l'évolution de la teinte du VTC et ainsi son hétérogénéité. Une deuxième caméra sera installée pour suivre l'évolution de la tache solaire et la répartition de l'éclairement au sol. Cela permettra d'améliorer les connaissances sur le VTC et in fine améliorer le modèle de comportement.

RÉFÉRENCES

- Aburas, M., Soebarto, V., Williamson, T., Liang, R., Ebendorff-Heidepriem, H., Wu, Y., 2019. Thermochromic smart window technologies for building application: A review. *Appl. Energy* 255, 113522. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113522>
- Ah-Nieme, A., Malet-Damour, B., Bigot, D., Guichard, S., Boyer, H., 2017. THE INFLUENCE OF THERMOCHROMIC GLAZING PARAMETERS ON ENERGY SAVING AND COMFORT CRITERIA USING MOMENT- INDEPENDENT MEASURE. Presented at the Australasian Building Simulation Conference 2017, Melbourne, Australia.
- Alamdari, F., Hammond, G., 1983. Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 4, 106–112.
- Allard, F., Inard, C., Roldan, A., 1985. Etude comparative de différentes méthodes de modélisation des échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs dans une cellule d'habitation, in: *Annales de l'Institut Technique Du Bâtiment et Des Travaux Publics*. pp. 30–60.
- Alvarez, G., Jiménez, D.N., Estrada, C.A., 1998. Thermal performance of solar control coatings: a mathematical model and its experimental verification. *J. Phys. Appl. Phys.* 31, 2249. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/18/009>
- ASHRAE, A.S., 2004. Standard 90.1-2004, Energy standard for buildings except low rise residential buildings. Am. Soc. Heat. Refrig. Air-Cond. Eng. Inc.
- Bachman, D., 2017. Grasshopper: Visual Scripting for Rhinoceros 3D, 1st ed. Industrial Press, Inc., New York, NY, USA.
- Baetens, R., Jelle, B.P., Gustavsen, A., 2010. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 94, 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.08.021>
- Bigot, D., 2011. Contribution à l'étude du couplage énergétique enveloppe/système dans le cas de parois complexes photovoltaïques (pc-pv) (PhD Thesis). La Réunion.
- Borgonovo, E., 2007. A new uncertainty importance measure. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 92, 771–784. <https://doi.org/10.1016/j.res.2006.04.015>
- Boyer, H., 1993. Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles. (PhD Thesis).

- Boyer, H., Fakra, A.H., Miranville, F., Malet-Damour, B., Guichard, S., Lauret, P., 2014. Evolution of CODYRUN from Thermal Simulation to Coupled Thermal and Daylight Simulation Software. *Energy Procedia*, 2013 ISES Solar World Congress 57, 1961–1968. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.060>
- Boyer, H., Garde, F., Gatina, J.C., Brau, J., 1998. A multimodel approach to building thermal simulation for design and research purposes. *Energy Build.* 28, 71–78. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00064-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00064-9)
- Brau, J., Roux, J.J., Krauss, G., 1992. *Cahier des algorithmes du logiciel CODYBA*. Paris : AFME.
- Caccavelli, D., 1988. *Modélisation du comportement thermique des bâtiments: adaptation a un processus de conception (PhD Thesis)*. Villeurbanne, INSA.
- Carmody, J., Selkowitz, S., Lee, E., Arasteh, D., Willmert, T., 2004. *Window systems for high-performance buildings*. Norton New York.
- Chang, T.-C., Cao, X., Bao, S.-H., Ji, S.-D., Luo, H.-J., Jin, P., 2018. Review on thermochromic vanadium dioxide based smart coatings: from lab to commercial application. *Adv. Manuf.* 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0209-2>
- Churchill, S.W., Usagi, R., 1974. A standardized procedure for the production of correlations in the form of a common empirical equation. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 13, 39–44.
- CIE, S., 2002. 008/E: 2001: Joint ISO/CIE Standard: Lighting of Work Places–Part 1: Indoor [incl. Technical Corrigendum ISO 8995: 2002/Cor. 1: 2005 (E)]. Vienna Austria Comm. Int. L’Eclairage.
- Conn, A.R., Gould, N.I., Toint, P.L., 2000. *Trust region methods*. SIAM.
- Costanzo, V., Evola, G., Marletta, L., 2016. Thermal and visual performance of real and theoretical thermochromic glazing solutions for office buildings. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 149, 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.01.008>
- Cuce, E., Riffat, S.B., 2015. A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41, 695–714. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.084>
- David, M., Donn, M., Garde, F., Lenoir, A., 2011. Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades. *Build. Environ.* 46, 1489–1496. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.022>
- Dietrich, M.K., Kramm, B.G., Becker, M., Meyer, B.K., Polity, A., Klar, P.J., 2015. Influence of doping with alkaline earth metals on the optical properties of thermochromic VO₂. *J. Appl. Phys.* 117, 185301. <https://doi.org/10.1063/1.4919433>

- DOE, U., 2010. Energyplus engineering reference. Ref. EnergyPlus Calc.
- Dou, S., Zhang, W., Wang, Yuemin, Tian, Y., Wang, Yi, Zhang, X., Zhang, L., Wang, L., Zhao, J., Li, Y., 2018. A facile method for the preparation of W-doped VO₂ films with lowered phase transition temperature, narrowed hysteresis loops and excellent cycle stability. *Mater. Chem. Phys.* <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.05.018>
- Fakra, A.H., 2009. Intégration de modèles d'éclairage à un code de calcul en physique du bâtiment: modélisation, validation et applications (PhD Thesis). Thèse Sci., Université de la Réunion, Réunion.
- Fakra, A.H., Miranville, F., Boyer, H., Guichard, S., 2011. Development of a new model to predict indoor daylighting: Integration in CODYRUN software and validation. *Energy Convers. Manag.* 52, 2724–2734. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.01.019>
- Favoino, F., Fiorito, F., Cannavale, A., Ranzi, G., Overend, M., 2016. Optimal control and performance of photovoltachromic switchable glazing for building integration in temperate climates. *Appl. Energy* 178, 943–961. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.107>
- Feng, W., Zou, L., Gao, G., Wu, G., Shen, J., Li, W., 2016. Gasochromic smart window: optical and thermal properties, energy simulation and feasibility analysis. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 144, 316–323. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.029>
- Gardiner, D.J., Morris, S.M., Coles, H.J., 2009. High-efficiency multistable switchable glazing using smectic A liquid crystals. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 93, 301–306. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.10.023>
- Garnier, B., Lanzetta, F., Lemasson, P., Virgone, J., 2011. Lecture 5A: Measurements with contact in heat transfer: principles, implementation and pitfalls. *Metti 5 Spring Sch. Roscoff June 13–18* 1–34.
- Ghosh, A., Norton, B., Duffy, A., 2016. Daylighting performance and glare calculation of a suspended particle device switchable glazing. *Sol. Energy* 132, 114–128. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.051>
- Giovannini, L., Favoino, F., Pellegrino, A., Lo Verso, V.R.M., Serra, V., Zinzi, M., 2019. Thermochromic glazing performance: From component experimental characterisation to whole building performance evaluation. *Appl. Energy* 251, 113335. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113335>
- Granqvist, C.G., 2016. Recent progress in thermochromics and electrochromics: A brief survey. *Thin Solid Films.* <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.02.029>
- Granqvist, C.G., 1990. Chromogenic materials for transmittance control of large-area windows. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* <https://doi.org/10.1080/10408439008242184>

- Granqvist, C.G., Lansåker, P.C., Mlyuka, N.R., Niklasson, G.A., Avendaño, E., 2009. Progress in chromogenics: New results for electrochromic and thermochromic materials and devices. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, IME-8 93, 2032–2039. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.02.026>
- Guichard, S., 2013. Contribution à l'étude des parois complexes intégrant des matériaux à changements de phase : modélisation, expérimentation, et évaluation de la performance énergétique globale (Theses). Université de la Réunion.
- Hoffmann, S., Lee, E.S., Clavero, C., 2014. Examination of the technical potential of near-infrared switching thermochromic windows for commercial building applications. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 123, 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.12.017>
- Hopkinson, R.G., 1963. *Architectural Physics: Lighting*.
- Hu, S., Li, S.-Y., Ahuja, R., Granqvist, C.G., Hermansson, K., Niklasson, G.A., Scheicher, R.H., 2012. Optical properties of Mg-doped VO₂: Absorption measurements and hybrid functional calculations. *Appl. Phys. Lett.* <https://doi.org/10.1063/1.4766167>
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S., 1985. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Hoboken NJ John Wiley 939–40.
- Jayamaha, S.E.G., Wijesundera, N.E., Chou, S.K., 1996. Measurement of the heat transfer coefficient for walls. *Build. Environ.* 31, 399–407. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(96\)00014-5](https://doi.org/10.1016/0360-1323(96)00014-5)
- Jean, A., 2015. Contribution to the Vegetalised Complex Partition study (VCP): Energetic performance evaluation under a tropical humid climate (Theses). Université de La Réunion.
- Jiang, M., Bao, S., Cao, X., Li, Y., Li, S., Zhou, H., Luo, H., Jin, P., 2014. Improved luminous transmittance and diminished yellow color in VO₂ energy efficient smart thin films by Zn doping. *Ceram. Int.* 40, 6331–6334. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.10.083>
- Kamalisarvestani, M., Saidur, R., Mekhilef, S., Javadi, F.S., 2013. Performance, materials and coating technologies of thermochromic thin films on smart windows. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 26, 353–364. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.038>
- Karlsson, J., Karlsson, B., Roos, A., 2001. A simple model for assessing the energy performance of windows. *Energy Build.* 33, 641–651. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00131-6)
- Karlsson, J., Roos, A., 2000. Modelling the angular behaviour of the total solar energy transmittance of windows. *Sol. Energy* 69, 321–329. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00083-9)

- Karlsson, J, Rubin, M., Roos, A., 2001. Evaluation of predictive models for the angle-dependent total solar energy transmittance of glazing materials. *Sol. Energy* 71, 23–31. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00024-X)
- Kokogiannakis, G., Darkwa, J., Aloisio, C., 2014. Simulating Thermochromic and Heat Mirror Glazing Systems in Hot and Cold Climates. *Energy Procedia*, 6th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-14 62, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.363>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Lauret, A.J.P., Mara, T.A., Boyer, H., Adelard, L., Garde, F., 2001. A validation methodology aid for improving a thermal building model: case of diffuse radiation accounting in a tropical climate. *Energy Build.* 33, 711–718. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00133-X)
- Lee, Eleanor S, Fernandes, L.L., Goudey, C.H., Jonsson, C.J., Curcija, D.C., Pang, X., DiBartolomeo, D., Hoffmann, S., 2013. A Pilot Demonstration of Electrochromic and Thermochromic Windows in the Denver Federal Center, Building 41, Denver, Colorado. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Berkeley, CA (United States).
- Lee, Eleanor S., Pang, X., Hoffmann, S., Goudey, H., Thanachareonkit, A., 2013. An empirical study of a full-scale polymer thermochromic window and its implications on material science development objectives. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 116, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.03.043>
- Li, S.-Y., Mlyuka, N.R., Primetzhofer, D., Hallén, A., Possnert, G., Niklasson, G.A., Granqvist, C.G., 2013. Bandgap widening in thermochromic Mg-doped VO₂ thin films: Quantitative data based on optical absorption. *Appl. Phys. Lett.* 103, 161907. <https://doi.org/10.1063/1.4826444>
- Li, S.-Y., Niklasson, G.A., Granqvist, C.G., 2012. Thermochromic fenestration with VO₂-based materials: Three challenges and how they can be met. *Thin Solid Films*, 7th International Symposium on Transparent Oxide Thin Films for Electronics and Optics (TOEO-7) 520, 3823–3828. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.10.053>
- Li, S.-Y., Niklasson, G.A., Granqvist, C.G., 2010. Nanothermochromics: Calculations for VO₂ nanoparticles in dielectric hosts show much improved luminous transmittance and solar energy transmittance modulation. *J. Appl. Phys.* <https://doi.org/10.1063/1.3487980>
- Liang, R., Wu, Y., Wilson, R., 2015. Thermal and visual comfort analysis of an office with thermochromic smart windows applied, in: *Proceedings of International Conference*

- CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale. LESO-PB, EPFL, pp. 71–76.
- Long, L., Ye, H., Zhang, H., Gao, Y., 2015. Performance demonstration and simulation of thermochromic double glazing in building applications. *Sol. Energy* 120, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.025>
- Loonen, R.C.G.M., Favoino, F., Hensen, J.L.M., Overend, M., 2017. Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. *J. Build. Perform. Simul.* 10, 205–223. <https://doi.org/10.1080/19401493.2016.1152303>
- Loonen, R.C.G.M., Trčka, M., Cóstola, D., Hensen, J.L.M., 2013. Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 25, 483–493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>
- Malet-Damour, B., 2015. Contribution à l'étude des dispositifs de guides lumineux tubulaires (DGLT) appliqués au bâtiment: expérimentation, modélisation et validation. La Réunion.
- Manning, T.D., Parkin, I.P., Pemble, M.E., Sheel, D., Vernardou, D., 2004. Intelligent Window Coatings: Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition of Tungsten-Doped Vanadium Dioxide. *Chem. Mater.* 16, 744–749. <https://doi.org/10.1021/cm034905y>
- Mara, T.A., 2000. CONTRIBUTION A LA VALIDATION GLOBALE D'UN LOGICIEL DE SIMULATION THERMO-AERAIQUE DU BATIMENT: PROPOSITION DE NOUVEAUX OUTILS D'AIDE A LA VALIDATION. (Theses). Université de la Réunion.
- McAdams, W., 1954. Heat transmission, McGraw-Hill. ed. New York.
- Miranville, F., 2002. Contribution à l'Etude des Parois Complexes en Physique du Bâtiment : Modélisation, Expérimentation et Validation Expérimentale de Complexes de Toitures incluant des Produits Minces Réfléchissants en climat tropical humide (Theses). Université de la Réunion.
- Miranville, F., Boyer, H., Lauret, P., Lucas, F., 2008. A combined approach for determining the thermal performance of radiant barriers under field conditions. *Sol. Energy* 82, 399–410. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.10.012>
- Mlyuka, N.R., Niklasson, G.A., Granqvist, C.G., 2009. Mg doping of thermochromic VO₂ films enhances the optical transmittance and decreases the metal-insulator transition temperature. *Appl. Phys. Lett.* <https://doi.org/10.1063/1.3229949>
- Montecchi, M., Polato, P., 1998. Predictive algorithm for luminous and solar properties of coated glasses based on the Equivalent Uncoated Material Model. *Riv. Della Stazione Sper. Vetro* 28, 55–62.

- Morin, F.J., 1959. Oxides Which Show a Metal-to-Insulator Transition at the Neel Temperature. *Phys. Rev. Lett.* 3, 34–36. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.3.34>
- Nitz, P., Hartwig, H., 2005. Solar control with thermotropic layers. *Sol. Energy, Polymeric Materials for Solar Energy Applications* 79, 573–582. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.12.009>
- Peleg, M., Corradini, M.G., Normand, M.D., 2007. The logistic (Verhulst) model for sigmoid microbial growth curves revisited. *Food Res. Int.* 40, 808–818. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.01.012>
- Rodler, A., 2014. Modélisation dynamique tridimensionnelle avec tache solaire pour la simulation du comportement thermique d'un bâtiment basse consommation (PhD Thesis).
- Roos, A., 1997. Optical characterization of coated glazings at oblique angles of incidence: measurements versus model calculations. *J. Non-Cryst. Solids, Coatings on Glass* 218, 247–255. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(97\)00074-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(97)00074-4)
- Rosenfeld, J.L.J., Platzer, W.J., van Dijk, H., Maccari, A., 2001. Modelling the optical and thermal properties of complex glazing: overview of recent developments. *Sol. Energy, EUROSUN 2000 Selected Proceedings* 69, Supplement 6, 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00028-7)
- Roudsari, M.S., Pak, M., Smith, A., others, 2013. Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design, in: *Proceedings of the 13th International IBPSA Conference Held in Lyon, France Aug.*
- Saeli, M., Piccirillo, C., Parkin, I.P., Binions, R., Ridley, I., 2010. Energy modelling studies of thermochromic glazing. *Energy Build.* 42, 1666–1673. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.04.010>
- Schläefer, J., Sol, C., Li, T., Malarde, D., Portnoi, M., Macdonald, T.J., Laney, S.K., Powell, M.J., Top, I., Parkin, I.P., Papakonstantinou, I., 2019. Thermochromic VO₂-SiO₂ nanocomposite smart window coatings with narrow phase transition hysteresis and transition gradient width. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 200, 109944. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109944>
- Selkowitz, S.E., Rubin, M., Lee, E.S., Sullivan, R., 1994. Review of electrochromic window performance factors 2255, 226–248. <https://doi.org/10.1117/12.185373>
- Silva, T., Vicente, R., Rodrigues, F., 2016. Literature review on the use of phase change materials in glazing and shading solutions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 53, 515–535. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.201>

- Soubdhan, T., Mara, T.A., Boyer, H., Younes, A., 2000. Chapter 376 - Use of Bestest Procedure to Improve A Building Thermal Simulation Program, in: Sayigh, A.A.M. (Ed.), *World Renewable Energy Congress VI*. Pergamon, Oxford, pp. 1800–1803. <https://doi.org/10.1016/B978-008043865-8/50376-7>
- Sparrow, E.M., Ramsey, J.W., Mass, E.A., 1979. Effect of Finite Width on Heat Transfer and Fluid Flow about an Inclined Rectangular Plate. *J. Heat Transf.* 101, 199–204. <https://doi.org/10.1115/1.3450946>
- Sturrock, N.S., 1971. *Localized Boundary-layer Heat Transfer from External Building Surfaces* (PhD Thesis). University of Liverpool.
- The SciPy community, 2020. `scipy.optimize.minimize` [WWW Document]. URL <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.minimize.html#scipy.optimize.minimize> (accessed 10.28.20).
- Verhulst, P.F., 1845. *Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de la population*. *Nouveaux Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles* n°18.
- Walton, G.N., 1983. *Thermal analysis research program reference manual*. US Department of Commerce, National Bureau of Standards Washington, DC, USA.
- Warwick, M.E.A., Ridley, I., Binions, R., 2015. The effect of variation in the transition hysteresis width and gradient in thermochromic glazing systems. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 140, 253–265. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.04.022>
- Warwick, M.E.A., Ridley, I., Binions, R., 2014. The effect of transition gradient in thermochromic glazing systems. *Energy Build.* 77, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.044>
- Warwick, M.E.A., Ridley, I., Binions, R., 2013. The Effect of Transition Hysteresis Width in Thermochromic Glazing Systems. *Open J. Energy Effic.* 2, 75–88. <https://doi.org/10.4236/ojee.2013.22011>
- Watanabe, H., 1998. Intelligent window using a hydrogel layer for energy efficiency. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 54, 203–211. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(98\)00072-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(98)00072-5)
- Wong, I.L., 2017. A review of daylighting design and implementation in buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 74, 959–968. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.061>
- Xu, X., Wu, X., Zhao, C., Wang, J., Ge, X., 2012. Simulation and improvement of energy consumption on intelligent glasses in typical cities of China. *Sci. China Technol. Sci.* 55, 1999–2005. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4854-1>

- Yamazaki, S., Ishida, H., Shimizu, D., Adachi, K., 2015. Photochromic Properties of Tungsten Oxide/Methylcellulose Composite Film Containing Dispersing Agents. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b09310>
- Yang, J., Xu, Z., Ye, H., Xu, X., Wu, X., Wang, J., 2015. Performance analyses of building energy on phase transition processes of VO₂ windows with an improved model. *Appl. Energy* 159, 502–508. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.130>
- Ye, H., Long, L., Zhang, H., Xu, B., Gao, Y., Kang, L., Chen, Z., 2013a. The demonstration and simulation of the application performance of the vanadium dioxide single glazing. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Dye Sensitized Solar Cells, Organic, Hybrid Solar Cells and New Concepts* 117, 168–173. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.05.061>
- Ye, H., Meng, X., Long, L., Xu, B., 2013b. The route to a perfect window. *Renew. Energy* 55, 448–455. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.003>
- Ye, H., Meng, X., Xu, B., 2012. Theoretical discussions of perfect window, ideal near infrared solar spectrum regulating window and current thermochromic window. *Energy Build.* 49, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.011>

ANNEXES

Annexe A.....161

Annexe B.....163

ANNEXE A : HYPOTHESE DE SIMULATION POUR LES TESTS DE COHERENCES

Latitude = -21°

Albédo = 0.2

Dimensions pièce monozone : 3 x 3 x 2.7 m

Dimension vitrage au nord : 2 x 0.8 m

Propriétés des matériaux :

Matériaux	Epaisseur [m]	Conductivité thermique [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Masse volumique [kg/m ³]	Chaleur spécifique [J.K ⁻¹ .kg ⁻¹]	α [-]	ρ [-]	ϵ [-]
Verre	0.006	1	840	2700	0.08	0.14	0.84
Béton (toutes les parois)	0.2	1.73	837	2243	0.8	0.2	0.9

Coefficients convectifs et radiatifs, intérieurs et extérieurs :

- $h_{ce} = 11.7 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$
- $h_{ci} = 5 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$
- $h_{rc} = 4.7 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$
- $h_{env} = 5.7 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$
- $h_{ri} = 5 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$

Hypothèses sur la température radiative de ciel et de l'environnement :

- $T_c = T_{ae} - 6$
- $T_{env} = T_{ae}$

La température de sol a été forcée 20°C pour les simulations.

ANNEXE B : FICHER METEO MARS2.MTO

Jour Julien	Mois	Jour dans le mois	Heure TSV	Tair ext [°C]	Direct hor. [W/m ²]	Diffus hor. [W/m ²]	HR ext [%]	Tc [°C]	Vitesse Vent	Dir Vent
66	3	1	1	192	0	0	84	130	10	6
66	3	1	2	187	0	0	86	120	20	6
66	3	1	3	185	0	0	85	120	20	5
66	3	1	4	183	0	0	84	120	20	6
66	3	1	5	185	0	0	82	120	20	6
66	3	1	6	183	0	0	82	120	20	8
66	3	1	7	202	98	40	78	140	20	5
66	3	1	8	248	280	94	72	180	20	1
66	3	1	9	257	479	126	69	190	20	20
66	3	1	10	261	542	195	65	200	20	12
66	3	1	11	260	363	323	68	200	10	15
66	3	1	12	253	331	369	69	190	20	15
66	3	1	13	276	433	338	61	210	20	18
66	3	1	14	270	289	347	66	210	20	21
66	3	1	15	276	90	301	64	210	10	25
66	3	1	16	242	6	169	75	180	20	19
66	3	1	17	243	5	96	79	180	20	18
66	3	1	18	234	12	50	80	170	10	9
66	3	1	19	226	0	0	83	160	10	9
66	3	1	20	221	0	0	83	160	20	10
66	3	1	21	218	0	0	87	150	20	9
66	3	1	22	218	0	0	85	150	20	11
66	3	1	23	200	0	0	88	140	20	1

Jour Julien	Mois	Jour dans le mois	Heure TSV	Tair ext [°C]	Direct hor. [W/m ²]	Diffus hor. [W/m ²]	HR ext [%]	Tc [°C]	Vitesse Vent	Dir Vent
66	3	1	24	190	0	0	90	130	10	1
67	3	2	1	194	0	0	88	130	20	6
67	3	2	2	183	0	0	88	120	20	1
67	3	2	3	189	0	0	87	120	10	6
67	3	2	4	188	0	0	81	120	20	6
67	3	2	5	187	0	0	82	120	10	6
67	3	2	6	181	0	0	82	120	10	6
67	3	2	7	198	93	42	79	130	10	7
67	3	2	8	251	266	100	65	190	10	5
67	3	2	9	266	479	126	63	200	10	8
67	3	2	10	272	598	171	62	210	10	26
67	3	2	11	266	626	226	63	200	10	24
67	3	2	12	272	679	237	64	210	20	22
67	3	2	13	270	548	289	65	210	20	24
67	3	2	14	257	375	325	68	190	10	21
67	3	2	15	273	193	269	63	210	10	21
67	3	2	16	252	9	202	74	190	10	27
67	3	2	17	257	4	124	76	190	10	19
67	3	2	18	240	8	41	79	180	10	1
67	3	2	19	219	0	0	84	150	10	1
67	3	2	20	207	0	0	89	140	20	1
67	3	2	21	204	0	0	88	140	10	1
67	3	2	22	204	0	0	87	140	10	1
67	3	2	23	200	0	0	85	140	10	5
67	3	2	24	199	0	0	85	130	20	5

LETTRE D'ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT

Je, soussigné(e) **Arthur AH-NIEME** en ma qualité de doctorant(e) de l'Université de La Réunion, déclare être conscient(e) que le plagiat est un acte délictueux passible de sanctions disciplinaires. Aussi, dans le respect de la propriété intellectuelle et du droit d'auteur, je m'engage à systématiquement citer mes sources, quelle qu'en soit la forme (textes, images, audiovisuel, internet), dans le cadre de la rédaction de ma thèse et de toute autre production scientifique, sachant que l'établissement est susceptible de soumettre le texte de ma thèse à un logiciel anti-plagiat.

Fait à **Saint-Philippe**, le (date) **17/11/2020**

Signature :



Extrait du Règlement intérieur de l'Université de La Réunion
(validé par le Conseil d'Administration en date du 11 décembre 2014)

Article 9. Protection de la propriété intellectuelle – Faux et usage de faux, contrefaçon, plagiat

L'utilisation des ressources informatiques de l'Université implique le respect de ses droits de propriété intellectuelle ainsi que ceux de ses partenaires et plus généralement, de tous tiers titulaires de tels droits.

En conséquence, chaque utilisateur doit :

- utiliser les logiciels dans les conditions de licences souscrites ;
- ne pas reproduire, copier, diffuser, modifier ou utiliser des logiciels, bases de données, pages Web, textes, images, photographies ou autres créations protégées par le droit d'auteur ou un droit privatif, sans avoir obtenu préalablement l'autorisation des titulaires de ces droits.

La contrefaçon et le faux

Conformément aux dispositions du code de la propriété intellectuelle, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle d'une œuvre de l'esprit faite sans le consentement de son auteur est illicite et constitue un délit pénal.

L'article 444-1 du code pénal dispose : « Constitue un faux toute altération frauduleuse de la vérité, de nature à causer un préjudice et accomplie par quelque moyen que ce soit, dans un écrit ou tout autre support d'expression de la pensée qui a pour objet ou qui peut avoir pour effet d'établir la preuve d'un droit ou d'un fait ayant des conséquences juridiques ».

L'article L335_3 du code de la propriété intellectuelle précise que : « Est également un délit de contrefaçon toute reproduction, représentation ou diffusion, par quelque moyen que ce soit, d'une œuvre de l'esprit en violation des droits de l'auteur, tels qu'ils sont définis et réglementés par la loi. Est également un délit de contrefaçon la violation de l'un des droits de l'auteur d'un logiciel (...) ».

Le plagiat est constitué par la copie, totale ou partielle d'un travail réalisé par autrui, lorsque la source empruntée n'est pas citée, quel que soit le moyen utilisé. Le plagiat constitue une violation du droit d'auteur (au sens des articles L 335-2 et L 335-3 du code de la propriété intellectuelle). Il peut être assimilé à un délit de contrefaçon. C'est aussi une faute disciplinaire, susceptible d'entraîner une sanction.

Les sources et les références utilisées dans le cadre des travaux (préparations, devoirs, mémoires, thèses, rapports de stage...) doivent être clairement citées. Des citations intégrales peuvent figurer dans les documents rendus, si elles sont assorties de leur référence (nom d'auteur, publication, date, éditeur...) et identifiées comme telles par des guillemets ou des italiques.

Les délits de contrefaçon, de plagiat et d'usage de faux peuvent donner lieu à une sanction disciplinaire indépendante de la mise en œuvre de poursuites pénales.