



HAL
open science

Contribution à l'étude du couplage énergétique enveloppe/système dans le cas de parois complexes photovoltaïques (PC - PV)

Dimitri Bigot

► **To cite this version:**

Dimitri Bigot. Contribution à l'étude du couplage énergétique enveloppe/système dans le cas de parois complexes photovoltaïques (PC - PV). Thermique [physics.class-ph]. Université de la Réunion, 2011. Français. NNT: . tel-00766755v1

HAL Id: tel-00766755

<https://theses.hal.science/tel-00766755v1>

Submitted on 18 Dec 2012 (v1), last revised 25 Mar 2014 (v2)

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

École doctorale Sciences, Technologies et Santé

Contribution à l'étude du couplage énergétique enveloppe/système dans le cas de parois complexes photovoltaïques (PC - PV)

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 10 Novembre 2011

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de La Réunion

(spécialité Physique du Bâtiment)

par

Dimitri Bigot

Composition du jury

<i>Directeur de thèse :</i>	Frédéric Miranville , Professeur	Université de La Réunion, France
<i>Rapporteurs :</i>	Philippe Poggi , Professeur	Université de Corse, France
	Belkacem Zeghmami, Professeur	Université de Perpignan, France
<i>Examineurs :</i>	Harry Boyer , Professeur	Université de La Réunion, France
	Milorad Bojic , Professeur	Université de Kragujevac, Serbie
	Philippe Lauret, Professeur	Université de La Réunion, France
	Jean-Claude Gatina, Professeur	Université de La Réunion, France

AVANT-PROPOS

La thèse présentée dans ce rapport a été réalisée à l'Université de La Réunion. Elle a fait l'objet d'une allocation de recherche ministérielle accompagnée d'un contrat de monitorat. Ce mode de financement m'a permis de découvrir l'enseignement, m'a apporté par le biais des formations de nouvelles compétences et a élargi tant mon cercle d'amis que mon cercle professionnel.

Premièrement, je tiens à remercier tous ceux qui ont pu m'aider pendant ces trois années, et tous ceux qui par leur présence m'ont apporté leur soutien ou égayé mes journées. Je remercie en particulier les équipes pédagogiques du département Sciences du Bâtiment et de l'Environnement au campus du Tampon et celle de Génie Civil à l'IUT de Saint-Pierre, ainsi que les personnels qui m'ont permis de travailler dans de bonnes conditions.

Deuxièmement, je tiens à remercier tous ceux qui ont participé à ma formation et qui nous ont transmis leur savoir durant toutes ces années, et particulièrement ceux que j'ai eu la chance de rencontrer durant ma thèse. Particulièrement, Sylvie Desqué pour la formation plus intéressante et enrichissante que j'ai eu sur les outils de communication et toutes ses autres formations. Mais aussi le Pr. Milorad Bojic pour ses formations et l'aide qu'il m'a apporté sur l'utilisation de GenOpt.

Troisièmement, je remercie l'ensemble des doctorants que j'ai pu rencontrer au cours de cette thèse, pour m'avoir fait partager leurs connaissances et leurs visions de la recherche et de la vie. Merci en particulier aux doctorants du laboratoire pour leur disponibilité et leur joie de vivre. Je pense en particulier à Frantz, Olivier, Stéphane, Aurélien, Néria, Placide, Boris, Aurélie, Christelle et Volana.

Quatrièmement, je remercie les professeurs Belkacem Zeghmati et Philippe Poggi pour avoir accepté de rapporter ce manuscrit. Je remercie également les autres membres du jury pour avoir accepté d'y participer, à savoir le Pr. Philippe Lauret, directeur du laboratoire PIMENT, et Michel Dijoux, Président du groupe Dijoux.

Je suis également très reconnaissant envers mon équipe de travail dans le laboratoire de m'avoir soutenu et aidé. Un grand merci à Damien Fakra pour tous ses conseils et son aide. Un grand merci également à Harry Boyer qui a dirigé ma thèse à mes débuts et qui a su me conseiller et m'aiguiller. J'exprime également ma gratitude à mon directeur de thèse, M. Frédéric Miranville, pour sa disponibilité, pour son enthousiasme, pour la confiance qu'il a mis en moi et pour tout le savoir qu'il m'a transmis.

Enfin, je tiens à remercier ma famille, pour tout le soutien qu'elle a m'apporté. Mon père qui a rendu possible la construction de mon futur foyer en sacrifiant ses temps libres, ma mère pour ses encouragements et sa confiance en moi et Honorine pour m'épauler et être dans ma vie.

RÉSUMÉ

Cette thèse présente un modèle thermique et électrique de paroi photovoltaïque (PV) intégrée ou semi-intégrée au bâtiment. La particularité du modèle est le transfert de chaleur entre le panneau et le bâtiment, décrit de telle manière que leurs modèles respectifs soient totalement couplés. Ceci a l'avantage de permettre la prédiction de l'impact de l'installation PV sur le champ de température du bâtiment et donc sur le confort thermique associé. Le but de l'étude est de mettre en évidence l'impact des panneaux PV en termes d'isolation thermique ou de protection solaire pour le bâtiment et la résultante en termes de gain énergétique.

De plus, une séquence expérimentale a été menée à l'île de La Réunion, où le climat est tropical et humide, avec un rayonnement solaire important. Dans de telles conditions, il est important de minimiser la sollicitation thermique à travers l'enveloppe du bâtiment, en particulier la toiture. Le modèle est intégré à un code de simulation thermique du bâtiment (ISOLAB) et peut prédire l'impact des panneaux PV installés selon différentes configurations, mais aussi le productible photovoltaïque de l'installation.

Finalement, l'étude expérimentale est utilisée pour fournir des éléments de validation du modèle numérique et une analyse de sensibilité est lancée pour mettre en évidence les paramètres les plus influents du modèle. Il a été démontré que les paramètres radiatifs du panneau PV ont un impact important sur le champ de température du bâtiment et que leur détermination doit être faite correctement. Les résultats de cette analyse sont ensuite utilisés pour optimiser le modèle thermique à l'aide du logiciel d'optimisation GenOpt.

ABSTRACT

This thesis presents a thermal and electrical modelling of PV walls integrated to buildings. The particularity of this model is that the heat transfer that occurs through the panel to the building is described so that both building and PV thermal modelling are fully coupled. This has the advantage of allowing the prediction of the impact of PV installation on the building temperature field and also the comfort inside it. The aim of this study is to show the impact of the PV panels in terms of level of insulation or solar protection for the building.

Moreover, the study has been conducted in La Reunion Island, where the climate is tropical and humid, with a strong solar radiation. In such conditions, it is important to minimise the thermal load through the roof of the building. The thermal model is integrated in a building simulation code and is able to predict the thermal impact of PV panels installed on buildings in several configurations and also their production of electricity.

Finally, the experimental study is used to give elements of validation for the numerical model and a sensitivity analysis has been run to put in evidence the governing parameters. It has been shown that the radiative properties of the PV panel have a great impact on the temperature field of the tested building and the determination of these parameters has to be taken with care. Results of sensitivity analysis are used to optimize the PV thermal model using the GenOpt optimization program.

LISTE DES SYMBOLES

$[A]_e$	Matrice évolution
$[A]_i$	Matrice identité
$[B]$	Matrice des sollicitations
$[T]$	Matrice des nœuds de températures
ΔP_r	Perte de charge régulière en Pa
ΔP_s	Perte de charge singulière en Pa
A	Facteur d'achèvement
θ	Angle d'inclinaison en $^\circ$
t	Exposant indiquant le pas de temps de la simulation
c	Indice de numéro de couche
f	Indice désignant le fluide
i	Indice de numéro de nœud d'une couche
p	Indice désignant la paroi
α	Diffusivité thermique en $m^2.s^{-2}$
C_p	Capacité thermique en $J.kg^{-1}.K^{-1}$
D_h	Diamètre hydraulique d'un écoulement de fluide en m
E	Ensoleillement en $W.m^{-2}$
f	Fonction continue dérivable quelconque
G	Ensoleillement en $W.m^2$
g	Accélération de la pesanteur en $m.s^{-2}$
G_{REF}	Ensoleillement aux conditions de référence en $W.m^2$
h_r	Coefficient d'échange radiatif en $W.m^{-2}.K^{-1}$
h_{cv}	Coefficient d'échange convectif en $W.m^{-2}$
h_{cv}	Coefficient d'échange convectif en $W.m^{-2}.K^{-1}$
I_0	Courant de saturation inverse en A
I_D	Courant aux bornes de la diode en A

Nomenclature

$I_{L,REF}$	Courant induit par le rayonnement solaire aux conditions de référence en A
I_L	Courant induit par le rayonnement solaire sur la cellule en A
$I_{mp,ref}$	Intensité du point de puissance maximale de référence en A
$I_{sc,ref}$	Courant de court-circuit en A
k	Constante de Boltzmann en $J.K^{-1}$
Nu	Nombre de Nusselt
P	Puit ou Source de chaleur en $W.m^{-3}$
P_{PV}	Puissance électrique produite par un champ de capteur solaire photovoltaïque en $W.m^{-2}$
Pr	Nombre de Prandtl
q	Charge électrique d'un électron en C
R_s	Résistance de série du système en Ω
Ra	Nombre de Rayleigh
Re	Nombre de Reynolds
T	Température en K
t	Temps en s
T_c	Température de ciel en K
T_{NOCT}	Température de fonctionnement nominal de la cellule PV
$T_{PV,REF}$	Température de cellule aux conditions de référence en K
T_{PV}	Température de cellule en K
U	Vitesse d'écoulement du fluide en $m.s^{-1}$
V	Tension de sortie en V
$V_{mp,ref}$	Tension du point de puissance maximale de référence en V
$V_{oc,ref}$	Tension de marche à vide en V
x	Distance en m
z	Altitude en m
α	Absorptivité
Δt	Pas de discrétisation temporelle en s
Δx	Pas de discrétisation spatiale en m
ϵ_G	Niveau d'énergie du matériau en eV
η	Rendement de conversion photovoltaïque en %
γ	Facteur de forme du panneau PV
λ	Conductivité thermique en $W.m^{-1}.K^{-1}$
μ_{isc}	Coefficient de température de courant de court-circuit en $A.K^{-1}$
μ_{PV}	Coefficient de rendement en fonction de la température en $\%C$

Nomenclature

μ_{voc}	Coefficient de température de tension de marche à vide en $V.K^{-1}$
ϕ	Flux en W
ρ_v	Masse volumique en $kg.m^{-3}$
ρ	Réfectivité
τ	Transmissivité
φ	Flux surfacique en $W.m^{-2}$
Gr	Nombre de Grashof
Gz	Nombre de Graetz
L	Longueur d'écoulement en m
St	Nombre de Stanton
V	Tension de sortie en V

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	3
Résumé	4
Abstract	5
Introduction	14
I Étude bibliographique	17
I.A Caractérisation phénoménologique de l'énergie solaire photovoltaïque	17
I.A.1 Historique de l'énergie photovoltaïque	18
I.A.2 Principe de conversion photovoltaïque	20
I.B Le système bâtiment	22
I.B.1 Modélisation des transferts thermiques conductifs	23
I.B.2 Modélisation des transferts thermiques convectifs	24
I.B.3 Modélisation des transferts thermiques radiatifs	24
I.B.4 Assemblage des modèles	26
I.B.5 Méthodologie	28
I.B.6 Prospection des modèles numériques « commerciaux » ou « libres » existants	29
I.C Description des panneaux photovoltaïques	29

TABLE DES MATIÈRES

I.C.1	Modélisation de panneaux PV	29
I.C.2	Modélisation de bâtiment intégrant des panneaux PV (BIPV)	37
I.C.3	Validation de modèles PV ou BIPV	37
I.D	Caractérisation des installations photovoltaïques intégrées ou semi-intégrées	39
I.D.1	Typologie des installations photovoltaïques	39
I.D.2	Propriétés optiques d'un panneau PV	39
I.D.3	Rendement et coefficient de rendement d'un panneau PV	41
I.D.4	Expérimentation PV	42
I.E	Conception de bâtiments BIPV	45
I.F	Confort thermique	46
I.G	Synthèse	48
II	Méthodologie et modélisation	51
II.A	Méthodologie	52
II.A.1	Modélisation d'un bâtiment par un code simulation	52
II.A.2	Modélisation d'un bâtiment au sein d'ISOLAB	53
II.A.3	Principe de modélisation intégrée d'un panneau PV	55
II.A.4	Expérimentation	56
II.A.5	Validation	57
II.A.6	Application de la méthode de validation	59
II.B	Modélisation des transferts convectifs au sein du panneau photovoltaïque	61
II.B.1	Convection sur les faces extérieure et intérieure de la paroi PV	62
II.B.2	Convection forcée dans une lame d'air ouverte aux extrémités	63
II.B.3	Convection naturelle dans une lame d'air ouverte aux extrémités	64

TABLE DES MATIÈRES

II.B.4 Convection naturelle dans une lame d'air confinée	65
II.C Modélisation des transferts radiatifs au sein du panneau photovoltaïque	66
II.D Modélisation des transferts conductifs au sein du panneau photovoltaïque	69
II.D.1 Cas des nœuds internes d'un milieu solide opaque	70
II.D.2 Cas des nœuds d'interface	72
II.E Modélisation électrique du panneau photovoltaïque	74
II.F Couplage des modèles	77
II.G Intégration du modèle de panneau PV à <i>ISOLAB</i>	79
II.H Conclusion du Chapitre II	81
III Expérimentation	85
III.A Plate-forme expérimentale	85
III.B Station météorologique	87
III.C Cellules à échelles réduites ISOTEST	89
III.D Instrumentation des cellules ISOTEST	91
III.D.1 Capteur de température de surface de paroi	92
III.D.2 Capteur de température d'air	93
III.D.3 Le capteur de température de globe noir	93
III.D.4 Flux-mètre	93
III.D.5 Multiplexeurs	94
III.D.6 Centrale d'acquisition	94
III.D.7 Calibration de l'expérimentation	94
III.E L'installation photovoltaïque	99
III.F Mesure des données électriques du système photovoltaïque	100

III.G Séquences expérimentales	102
III.G.1 Impact d'une installation PV sur la température dans le bâtiment	102
III.G.2 Etude comparative de l'installation PV semi-intégrée en toiture	102
III.H Conclusion du Chapitre III	105
IV Validation de modèle et Optimisation paramétrique	108
IV.A Méthodologie de validation	108
IV.A.1 Analyse de sensibilité paramétrique	110
IV.A.2 Optimisation des paramètres du modèle	113
IV.B Présentation des cas d'études	116
IV.B.1 Présentation de l'étude 1 : le bâtiment sans installation PV	117
IV.B.2 Présentation de l'étude 2 : le bâtiment BIPV	118
IV.C Etude 1 : Application de la méthode de validation à la cellule ISOTEST 1	119
IV.C.1 Confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 1	119
IV.C.2 Analyse de sensibilité de la cellule ISOTEST 1	124
IV.C.3 Optimisation du modèle de la cellule ISOTEST 1	126
IV.C.4 Corroboration des résultats pour le modèle de la cellule ISOTEST 1	129
IV.D Étude 2 : Application de la méthode de validation aux cellule ISOTEST 2 et 3	131
IV.D.1 Validation de la cellule ISOTEST 2	133
IV.D.2 Corroboration des résultats pour le modèle de la cellule ISOTEST 2	143
IV.D.3 Validation de la cellule ISOTEST 3	144
IV.D.4 Optimisation du modèle de la cellule ISOTEST 3	150
IV.E Étude de cas : un bâtiment à échelle 1, la cellule LGI	152
IV.F Conclusion du Chapitre IV	158

TABLE DES MATIÈRES

Conclusion	161
IV.G Conclusion	161
IV.H perspectives	162
Bibliographie	164
A Modélisation thermique	164
B Modélisation PV	167
C Expérimentation PV	169
D Intégration photovoltaïque au bâtiment (BIPV)	171
E Conception PV et études de cas	172
F Articles publiés durant la thèse	175
Annexes	183
A Tarifs d'achat de l'électricité photovoltaïque au 1 ^{er} Juillet 2011.	184
B Exemples de spectre solaire	184
C Conversion photovoltaïque au sein d'un semi conducteur	184
D Rendement, avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques	185
E Lettre d'attestation de labellisation du projet PVbat	186
F Prise en compte de l'effet du vent pour la convection forcée dans les lames d'air ouvertes	187
G Prise en compte des pertes de charge dans la lame d'air	187
H Fiche technique du panneau PV installés sur les ISOTEST lors des séquences expérimentales	190

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ces dernières années, l'Environnement a pris une dimension importante au sein de notre société. En ce qui concerne notre consommation énergétique et l'avenir de la planète, les scénarios présentés sont plutôt pessimistes si rien n'est fait pour limiter ou enrayer le réchauffement climatique. En effet, notre mode de consommation actuel accentue ce réchauffement, essentiellement à cause des émissions de gaz à effet de serre (GES). Depuis le Sommet de la Terre à Rio de Janeiro au Brésil (Juin 1992), des réflexions sont menées pour essayer de trouver des solutions afin de diminuer la production de ces gaz. Cette réflexion est menée au niveau mondial par la grande majorité des états concernés. En 1997, lors de la conférence sur le climat à Kyoto, un premier pas a été fait, et 159 pays ont signé un protocole (de Kyoto, Japon) ratifiant la volonté de réduire de 5,2% en moyenne la production des gaz à effet de serre avant 2012 (-8% pour l'Union Européenne, -7% pour les États-Unis et -6% pour le Japon). En 2012, la conférence sur le changement climatique à Copenhague (Danemark) permettra de faire le point sur ces objectifs. Un nouveau pari est pris de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 20% d'ici 2020. Une réflexion est actuellement en cours pour porter cet objectif de réduction à 30%.

En France, des efforts ont été faits par les pouvoirs publics pour atteindre, voir même dépasser ces objectifs. En 1994, la France ratifie la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, et approuve ainsi la nécessité que chaque pays doit prendre ses responsabilités pour lutter contre le changement climatique. En 2000, un programme national de lutte contre l'effet de serre comprenant 96 mesures est mis en place, dont l'instauration d'une fiscalité écologique dissuasive, la relance des aides publiques aux économies d'énergie et au développement des énergies renouvelables, le développement des transports en commun, la recherche d'un accord européen pour limiter la vitesse des véhicules légers et l'organisation d'un marché d'échange de « permis de polluer » destiné à se fondre après 2008 dans un dispositif mondial. Durant les années 2000, plusieurs mesures ont été prises par l'état français pour atteindre les objectifs instaurés lors des conférences de Rio et de Kyoto. En 2007, pendant le Grenelle de l'Environnement, un plan d'action constitué de 15 à 20 mesures a été présenté. A La Réunion, Le Grenelle de l'environnement a été retranscrit dans le projet GERRI (Grenelle de l'Environnement à la Réunion - Réussir l'Innovation, ou Green Energy Revolution - Reunion Island).

Certaines de ces mesures favorisent l'utilisation des énergies renouvelables dans la lutte contre le réchauffement climatique, en particulier l'utilisation de l'énergie solaire. Cette énergie est disponible et gratuite partout sur la planète, et ne produit pas de gaz à effet de serre. Elle peut être utilisée sous deux formes, l'une thermique en transformant le rayonnement solaire en chaleur, l'autre photovoltaïque en le transformant en électricité. Les systèmes permettant de récupérer ces formes d'énergie sont le plus souvent des panneaux qui sont ensuite installés sur des parois (murs ou toitures), comme indiqué sur la Figure I.2 20. Ce genre de système peut être assimilé à une paroi complexe de bâtiment. Quand ces panneaux sont installés sur la paroi de manière à dénaturer le moins possible l'architecture du bâtiment qui les supporte, le panneau est dit intégré au bâtiment. La particularité de ce type de panneau est que

l'intégration au bâtiment permet, en France, d'accéder à des offres encore plus intéressantes pour le maître d'ouvrage (voir Tableau A - 15 en annexes p.184).

Dans la course à l'énergie propre, le soleil est l'un de nos atouts. Il peut nous aider à remplir les objectifs mondiaux de réduction des gaz à effet de serre en nous fournissant de l'énergie propre. Que ce soit directement grâce aux panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques, ou indirectement par l'intermédiaire du vent ou des plantes. Ces dernières années, les installations photovoltaïques se sont énormément développées, surtout à La Réunion qui est un fer de lance de la France dans le domaine des énergies nouvelles.

Mais le soleil peut aussi être une source de consommation d'énergies émettrices de gaz à effet de serre dans les régions du monde où, comme à La Réunion, le climat est tropical et humide. Longtemps, la solution choisie pour abaisser la température dans les bâtiments était l'emploi de systèmes actifs (consommateurs d'énergie). De nos jours, il est de plus en plus préconisé de recourir à des solutions dites passives. Elles ont pour premier but d'améliorer le bâtiment de telle manière qu'il subisse le moins possible les effets du rayonnement solaire.

La thèse présentée ici porte sur l'étude des panneaux photovoltaïques en tant que parois complexes intégrées au bâtiment. L'étude va être menée d'un point de vue thermique dans le but de répondre à deux objectifs :

1. Évaluer l'impact de l'installation de panneaux photovoltaïques sur la performance thermique de composants d'enveloppe du bâtiment et sur les conditions de confort des occupants ;
2. Évaluer l'impact de l'interaction bâtiment/panneaux PV sur le rendement de l'installation et l'optimisation de performance.

Une étude bibliographique a montré que les modèles thermiques de panneaux photovoltaïques (panneaux PV) existants ne prennent pas en compte de manière totalement couplée les échanges de flux thermiques entre les panneaux et les parois du bâtiment sur lesquelles ceux-ci sont installés. De plus, aucune étude n'a étudié l'impact de telles installations sur le confort thermique à l'intérieur du bâtiment. Il a semblé alors intéressant de mener les études nécessaires pour essayer de contribuer au développement des connaissances sur ce sujet.

Premièrement, l'étude bibliographique sera présentée et permettra de mettre en place tous les éléments nécessaires à cette étude : le principe de fonctionnement d'un panneau PV, les phénomènes physiques mis en jeu dans le système, les caractéristiques particulières liées aux propriétés physiques du système (milieu semi-transparent et matériau photovoltaïque). De plus, cette étude a permis de prendre connaissance des expérimentations existantes dans le champ des panneaux PV intégrés au bâtiment et une brève présentation de ces installations sera faite.

Deuxièmement, la méthodologie sera présentée. Cette méthode, reconnue par la communauté scientifique, combine les activités de **Modélisation**, d'**Expérimentation** et de **Validation**. Nous conviendrons de l'appeler la méthode MEV [Bigot *et al.*, 2010b]. Cette méthode consiste à créer le modèle qui décrira le fonctionnement physique du système étudié, de mettre en place une expérimentation représentative et de valider le modèle à travers une confrontation modèle/mesure. De par ces différentes étapes, elle permet de s'assurer de la cohérence du modèle, de tester sa robustesse et si besoin de l'optimiser afin d'atteindre une précision suffisante pour pouvoir valider le modèle.

Troisièmement, le modèle physique sera présenté. La particularité du modèle est liée à la configuration du système qu'il doit décrire. Ici deux points importants entrent en jeu : la semi-transparence de

certaines des couches du panneau PV et les couches de fluide présentes dans la paroi. Pour décrire les échanges radiatifs dans le milieu semi-transparent, une méthode de tracé de rayon ("ray tracing") a été utilisée, alors que la modélisation des lames de fluides a été faite par une méthode traditionnelle de calcul du coefficient d'échange convectif aux interfaces fluide/solide.

Quatrièmement, les expérimentations qui ont été utilisées seront présentées, et les mesures récoltées seront commentées. La plateforme qui a servi pour l'expérimentation se situe à l'IUT de Saint-Pierre (La Réunion, France) et se compose d'une station météorologique, de quatre bâtiments à échelle réduite (cellules ISOTEST) et d'un bâtiment à échelle 1 (cellule LGI). Cette plateforme permet de collecter les données climatiques du site au fil des expérimentations et ainsi d'avoir des données qui pourront être confrontées aux résultats de simulation.

Enfin, le modèle sera confronté aux mesures, et une démarche de validation sera proposée. Cette démarche, applicable à d'autres cas d'études à l'avenir, permet de vérifier la pertinence des résultats obtenus et de préconiser des prescriptions à la fois techniques et performantielles pour les systèmes PV.

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'étude bibliographique propose un état de l'art des différents domaines impliqués dans la caractérisation de notre système. Une prospection a été menée dans les différents champs de l'étude en essayant de recouper les informations correspondant le plus aux besoins. Tout d'abord, la recherche a porté sur le panneau photovoltaïque en général et sur les phénomènes entrant en jeu dans la production d'électricité. Ensuite le champ de recherche s'est élargi aux différentes études qui ont déjà été menées et un recoupement a été fait pour déterminer quelles études étaient les plus pertinentes. Ce travail a abouti à l'étude bibliographique présentée dans ce chapitre.

La première partie présente une caractérisation phénoménologique de l'énergie solaire photovoltaïque. Elle contient un bref historique de cette forme d'énergie, de sa découverte en 1839 à nos jours, donne des détails sur la conversion photovoltaïque, ainsi que quelques points techniques à prendre en compte lors de la modélisation. Les deuxième et troisième parties présentent un échantillon des études qui sont généralement faites au niveau, respectivement, du bâtiment et des panneaux photovoltaïques. La quatrième partie présente l'intégration des panneaux photovoltaïques au bâtiment.

I.A CARACTÉRISATION PHÉNOMÉNOLOGIQUE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie solaire est le rayonnement émis par le soleil. Dans l'espace, au niveau de l'orbite terrestre, la densité de rayonnement reçue par un objet est d'environ 1300 W.m^{-2} . Au sol, après absorption et réflexion d'une partie de cette énergie par l'atmosphère, le rayonnement solaire surfacique reçu pourra varier entre zéro et près de 1400 W.m^{-2} en fonction de l'heure et des conditions climatiques. Le plus gros avantage de cette énergie est qu'elle est disponible quasiment partout sur la planète. Elle peut être récupérée de deux manières : sous forme de **chaleur** ou sous forme d'**électricité**.

Sous forme de chaleur, le système de récupération de l'énergie consiste à absorber le rayonnement solaire par l'intermédiaire d'un absorbeur (souvent une surface de couleur sombre dont les propriétés radiatives permettent de récupérer un maximum d'énergie). La chaleur est ensuite généralement transmise à un fluide calo-porteur qui va être soit directement utilisé (eau chaude sanitaire), soit distribuée dans un réseau pour transporter la chaleur aux endroits où l'on en a besoin (réseau de chauffage). Dans

la plupart de ces cas, un stockage du fluide calo-porteur est utilisé pour permettre une meilleure gestion de la ressource solaire intermittente.

Sous forme d'électricité, le rayonnement solaire va être converti en électricité lors de son passage dans un matériau semi-conducteur spécifique. Les semi-conducteurs utilisés dans les panneaux photovoltaïques ont pour particularité de produire du courant lorsqu'ils sont soumis au rayonnement solaire. Sous cette forme, l'énergie solaire peut être utilisée pour une plus grande palettes de systèmes. En revanche, les propriétés des semi-conducteurs au niveau de la conversion électrique ne sont parfois pas suffisamment intéressantes. Afin de mieux comprendre ce phénomène et pouvoir décrire ce qu'il engendre aux niveaux thermique et électrique, un historique de l'énergie solaire photovoltaïque va être présenté et le principe de conversion photovoltaïque sera détaillé.

I.A.1 Historique de l'énergie photovoltaïque

C'est en 1839 que A.C. Becquerel remarque les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique d'acide. En 1875, W. Von Siemens confirme cette découverte avec son article sur l'effet photovoltaïque dans les matériaux semi-conducteurs. D'autres expériences vont par la suite porter sur ce sujet et amener d'autres éléments pour étoffer cette nouvelle branche de la physique.

Trois hommes ont participé de manière forte aux avancées les plus importantes dans ce domaine entre sa découverte et la seconde guerre mondiale, et ils ont tous les trois été récompensés par un prix nobel : Lenard en 1905, Einstein en 1921, et Milikan en 1923. Lenard a déterminé en 1902 le rapport entre la masse et la charge de l'électron. Einstein, en utilisant l'hypothèse de Planck¹, a proposé une solution pour éprouver la théorie quantique de la lumière aux moyens des mesures quantitatives de l'effet photovoltaïque. Milikan quand a lui a validé la théorie d'Einstein par l'expérimentation suggérée.

C'est bien plus tard, en 1954, lors des balbutiements des voyages vers l'espace que la première cellule photovoltaïque à "haut rendement" est créée par trois chercheurs américains pour le compte de la NASA (Chapin, Pearson et Prince des laboratoires Bell Telephone). En France, elle sera réalisée pour la première fois par des chercheurs du CNRS en 1960 (M. Rodot et H. Valdman du CNRS). La première crise pétrolière de 1973 va engendrer le premier grand essor de la technologie solaire photovoltaïque, car nombreux seront ceux qui voudront trouver une alternative sûre au pétrole sur le long terme.

Depuis cette crise, elle a surtout été utilisée pour alimenter en électricité des installations qui étaient hors de portée des réseaux électriques traditionnels (installations en site isolé). Aujourd'hui, elle s'intègre dans une démarche de développement durable et de protection de l'environnement. Ce changement a favorisé le développement actuel de la technologie solaire photovoltaïque : les aides et les avantages apportés aux acquéreurs de ce type de technologie (crédits d'impôts, subventions) ont permis de diminuer sensiblement les coûts des installations.

1. En 1900, M. Planck découvre une expression empirique du spectre de rayonnement d'un corps. Il arrive à déduire cette expression d'une hypothèse qui décrit que l'énergie d'oscillations des molécules est distribué en un nombre infini de petites quantités discrètes associées chacune à autant de fréquences d'oscillation. Deux exemples illustrant l'hypothèse de Planck sont disponibles sur la Figure A - 51 en annexes p.184.



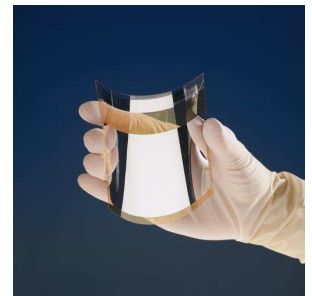
(a) Cellule photovoltaïque monocristalline. Source : <http://www.ecosources.info>



(b) Cellule photovoltaïque polycristalline. Source : <http://pamiers.soleilentete.com>



(c) Cellule photovoltaïque amorphe. Source : <http://www.ecosources.info>



(d) Cellule photovoltaïque organique souple. Source : CEA



(e) Assemblage de cellules en panneaux photovoltaïques (panneaux PV). Source : <http://www.rdv-solaire.com>

FIGURE I.1 : Exemples de types de technologie photovoltaïque.

Actuellement, la recherche dans le domaine de l'énergie photovoltaïque concerne principalement les points suivants :

- L'amélioration de la production électrique des technologies existantes (monocristallin, polycristallin, organique, amorphe, etc. comme sur la Figure I.5) ;
- Les domaines d'utilisation des différentes technologies ;
- L'intégration des systèmes de production photovoltaïques au réseau électrique public ;
- La combinaison du photovoltaïque avec le solaire par exemple (panneaux PV/T) ;
- L'intégration de la technologie photovoltaïque dans le bâtiment (en toiture, dans les vitrages, etc.).



(a) Ferme photovoltaïque. Source : www.energiegratuite.biz



(b) Installation photovoltaïque en site isolé (Marla, Réunion). Source : fr.academic.ru



(c) Installation photovoltaïque en toiture (Réunion). Source : www.hallou-solaire.com



(d) Verrière photovoltaïque. Source : ADEME

FIGURE I.2 : Exemples d'installations photovoltaïques.

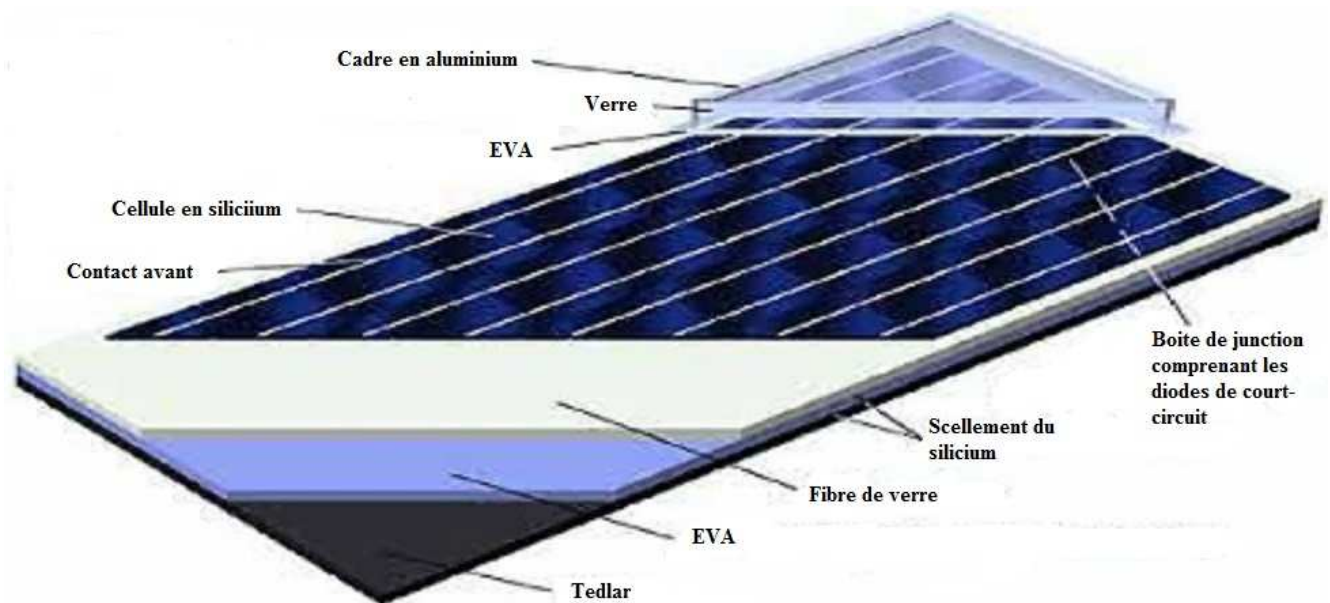


FIGURE I.3 : Composition type d'un panneau photovoltaïque, vue en coupe. Source : www.memoireonline.com

I.A.2 Principe de conversion photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est la transformation d'une partie de l'énergie solaire arrivant sur les panneaux en électricité. Ce phénomène est dû aux propriétés physiques du matériau qui constitue les cellules photovoltaïques : les semi-conducteurs. La plupart des systèmes photovoltaïques se présentent sous la forme de panneaux. Ces panneaux sont soit posés sur des supports directement orientés vers le soleil (installations de plein pied ou encore satellites), soit installés le long de parois de bâtiments, ou même incorporés à des parois de bâtiments (tel que dans les vitrages) comme le montre la Figure I.2. Un panneau est lui-même constitué de plusieurs cellules plus petites. Ces cellules sont généralement constituées de la face avant (éclairée) vers la face arrière des parties suivantes (voir Figure I.3), ainsi qu'indiqué ci-dessous :

- Couche de protection transparente (généralement en verre) ;
- Contacts de la face avant (ils ne recouvrent pas toute la surface de la cellule pour laisser passer le rayonnement solaire) ;
- Une première couche de semi-conducteur (silicium) dopé positivement ou négativement ;
- Une deuxième couche de semi-conducteur dopé à l'inverse de la première couche ;
- Une dernière couche qui contient généralement les contacts de la face arrière de la cellule photovoltaïque :
 - ⇒ transparente si le souci de luminosité en dessous du panneau se pose ;
 - ⇒ une couche de réflexion du rayonnement solaire (pour améliorer l'efficacité du panneau) ;
 - ⇒ ou encore une couche de type « absorbeur » (si le but est de réchauffer ce qui est en dessous de la cellule).

À l'intérieur d'une cellule photovoltaïque, le rayonnement solaire va traverser plusieurs couches avant d'atteindre la couche semi-conductrice. Les phénomènes radiatifs à l'intérieur de ces couches sont plutôt complexes, plus de précisions seront données à ce sujet dans le Chapitre II de cette thèse. Au niveau de la couche semi-conductrice, le rayonnement va être en partie converti en électricité. Cette conversion se fera lorsque la lumière entrera en contact avec le semi-conducteur. Sous l'action de la lumière, le semi-conducteur va engendrer un déplacement d'électrons en son sein. Plus le déplacement d'électron sera important, plus la cellule photovoltaïque produira d'électricité. Ce déplacement va être fonction du type de semi-conducteur et de son dopage.

Le dopage d'un semi-conducteur est son taux de surcharge ou de déficit en électrons. Il est obtenu en lui ajoutant ou en lui enlevant des électrons. On y parvient en insérant dans le cristal (de silicium par exemple) un atome qui a plus ou moins d'électrons libres (de valence) que l'atome constituant le semi-conducteur. Prenons l'exemple du silicium : il possède quatre électrons de valence sur sa couche extérieure, il faut donc insérer dans le cristal de silicium un atome avec cinq électrons de valence (dopage de type N) ou avec trois électrons de valence (dopage de type P), comme on peut le voir sur la Figure A - 52 en annexes p. 185. La juxtaposition de deux couches de semi-conducteurs de type de dopages différents (N ou P) crée un champ électrique qui facilite le déplacement des électrons lorsque les photons entrent en collision avec le matériau semi-conducteur.

De nos jours, le matériau le plus couramment utilisé est le silicium sous ces différentes formes. Le choix de tel ou tel type de matériau se base très souvent sur le rendement que l'on veut obtenir au niveau de la production d'électricité, du coût du panneau PV et du type d'installation à mettre en place. Le Tableau A - 16, situé en annexes p.185, donne les types de cellules existantes, leurs rendements énergétiques (c'est-à-dire l'énergie électrique récupérée par rapport à l'énergie solaire reçue), leurs avantages et leurs inconvénients [Muresan, 2005]. Dans la famille du silicium cristallin, il faut faire la distinction entre deux groupes de panneaux PV : ceux à cellules monocristallines, et ceux à cellules polycristallines. Comme leurs noms l'indiquent, leur différence tient à la méthode utilisée pour les concevoir :

- pour les cellules monocristallines, la cellule est obtenue en découpant une tranche de cristal de silicium suffisamment grand pour la contenir ;
- pour les cellules polycristallines, la cellule est obtenue en superposant des couches de cristaux très minces généralement les chutes issues de l'équarrissage des cristaux utilisés pour la cellule monocristalline, mais aussi les chutes issues du recyclage de l'industrie électronique.

La deuxième méthode citée a pour inconvénient de fragmenter la surface de réception de la lumière, ce qui implique une moins bonne absorption de celle-ci, et le moins bon rendement des cellules polycristallines.

I.B LE SYSTÈME BÂTIMENT

Cette thèse a pour but l'étude de l'interaction thermique entre un panneau PV et un bâtiment. L'intérêt se portant principalement sur l'aspect thermique (en tout cas en ce qui concerne le bâtiment), la modélisation électrique du bâtiment, et donc de son couplage avec le panneau PV le cas échéant, a été laissée de côté. Elle pourra faire l'objet d'autres études après cette thèse. Dans cette partie, uniquement ce qui est en rapport avec la modélisation thermique du bâtiment va être présentée.

Dans le code de simulation utilisé comme base de travail dans cette thèse, *ISOLAB*, la modélisation multizones a été choisie pour représenter le comportement thermique du bâtiment. ce choix semblait le meilleur compromis entre les codes de champs, très détaillés, et les codes monozones, très simplifiés. Le code multizones est basé sur un découpage du bâtiment en pièces ou ensemble de pièces (les zones) délimitées par des parois. Pour la partie thermique, ce code est basé sur les équations de bilan énergétique des parois du bâtiment et sur celles du bilan thermo-convectif du volume d'air des zones qui le composent. L'écriture de ces bilans pour l'ensemble des zones mène à un système d'équations, qui une fois résolu, fournit les températures et les flux au travers de ses éléments constitutifs.

Le bâtiment est donc décrit comme un ensemble de zones (pièces ou ensemble de pièces) séparées par des interzones (parois), le tout soumis à des conditions climatiques (ensoleillement, température extérieure, humidité, vent, etc.) au sein d'un environnement. De par ces conditions climatiques et cet environnement, plusieurs phénomènes physiques doivent être pris en compte :

- Les transferts conductifs, entre le sol et le bâtiment ou entre le bâtiment et d'autres adjacents ;
- Les transferts convectifs, issus du mouvement d'air engendré par le vent tout autour du bâtiment ;
- Les transferts radiatifs, entre le bâtiment et le soleil, le ciel et son environnement (montagnes, arbres, autres bâtiments, etc.).

A l'intérieur du bâtiment, des transferts conductifs, convectifs et radiatifs auront également lieu, respectivement à travers les parois, entre les volumes d'air des zones et les parois et entre les parois des zones. Le transfert conductif en particulier est représenté grâce à l'équation de la chaleur, avec conditions aux limites du problème des flux. Ces flux peuvent être liés à une source de chaleur interne au matériau ou peuvent être fonction des phénomènes convectifs et/ou radiatifs présents aux bornes d'un matériau. Chaque élément du bâtiment aboutit donc à une équation contenant les trois types de transferts interagissant les uns avec les autres.

Les bilans énergétiques précédemment cités sont issus de la description de ces différents phénomènes. L'assemblage des différentes équations décrivant les éléments du bâtiment (zones, interzones, composants) donne un système d'équations décrivant le comportement thermique du bâtiment dans son ensemble. Le discrétisation des différents éléments conditionne la complexité de ce système d'équations (1D, 2D ou 3D) et par conséquent le temps nécessaire à sa résolution et la précision des résultats.

En ce qui concerne *ISOLAB*, le choix a été fait de discrétiser les parois en 1D, ce qui a abouti à une représentation nodale du problème de transfert de chaleur, représentation suffisante dans le cadre d'études saisonnières ou annuelles du comportement thermique du bâtiment. La méthode de discrétisation spatio-temporelle de l'équation de la chaleur est appliquée au système d'équations, qui est ensuite retranscrit sous forme matricielle pour faciliter la résolution du problème.

La résolution peut-être alors être faite en implémentent le problème à l'aide d'un logiciel de programmation. Dans le cas d'*ISOLAB*, l'implémentation a été faite sous l'environnement *MATLAB*, qui est spécialisé dans la gestion et la résolution des problèmes de forme matricielle.

Ce qui suit présente donc la modélisation des différents types de transfert thermique entrant en jeu dans un bâtiment, leur couplage et la méthode de résolution dans le cas d'*ISOLAB*. Puis, une prospection des modèles thermiques de bâtiments existants est présentée ainsi que l'intérêt de créer un modèle de panneau PV couplé au bâtiment.

I.B.1 Modélisation des transferts thermiques conductifs

La modélisation des transferts conductifs consiste à définir de quelle manière le flux thermique va traverser un matériau solide. Ce flux va être fonction des caractéristiques thermo-physiques du matériau qu'il traverse et des conditions aux limites. L'équation de la chaleur (I.1) permet de décrire et de quantifier ce flux. Pour faciliter l'intégration d'un modèle de panneau PV au modèle de bâtiment existant, en l'occurrence *ISOLAB* [Miranville, 2002], le choix a été fait de discrétiser l'équation de la chaleur de manière spatio-temporelle selon la méthode des différences finies.

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{P}{\lambda} \quad (I.1)$$

Avec $\alpha = \frac{\lambda}{\rho_v \cdot C_p}$

Et P un puits ou une source de chaleur dans le matériau.

De plus, du fait du découpage du bâtiment en un ensemble de zones et interzones, le problème conductif se ramène à un transfert de flux mono-dimensionnel (1D) normalement à la paroi. Aussi, les parois du bâtiment sont considérées sans source ou puits de chaleur. Ces hypothèses ramènent le problème à l'équation suivante :

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} - \frac{P}{\lambda} \quad (I.2)$$

La méthode des différences finies permet d'approcher les dérivées partielles. L'approximation est alors calculée grâce aux taux d'accroissement spatial et temporel. Dans le cas de l'équation de la chaleur, la dérivée partielle temporelle peut-être approchée par l'équation (I.3), et celle spatiale par l'équation (I.4).

$$\frac{\partial T}{\partial t} \simeq \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} \quad (I.3)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \simeq \frac{(T(x + \Delta x) - T(x - \Delta x)) - 2 \cdot T(x)}{\Delta x^2} \quad (I.4)$$

L'application de cette méthode au cas des parois photovoltaïques sera présenté plus loin dans ce mémoire.

I.B.2 Modélisation des transferts thermiques convectifs

La modélisation des transferts convectifs décrira le flux échangé entre un solide et un fluide (dans le cas d'un bâtiment, entre une paroi et l'air extérieur ou l'air d'une pièce). Elle peut être faite grâce à différentes méthodes, telles que des bilans convectifs simples (calcul d'un coefficient d'échange convectif moyen) ou encore par la modélisation en volumes finis de l'écoulement du fluide en partant des équations de Navier-Stokes. Cette dernière est très onéreuse en temps de calcul (plusieurs jours avec un ordinateur). Or ISOLAB, le logiciel auquel doit être ajouté le modèle de panneau PV, doit permettre des simulations peu consommatrices en temps de calcul : L'utilisateur doit pouvoir simuler son bâtiment en quelques minutes.

Le coefficient d'échange convectif sera calculé par rapport au nombre de Nusselt Nu (I.5) [Bejan, 1984]. Ce nombre va représenter l'importance de l'échange convectif.

$$Nu = \frac{h_{cv} \cdot D_h}{\lambda} \quad (I.5)$$

En fonction du type de convection, le nombre de Nusselt sera déterminé différemment :

- par l'intermédiaire des nombres de Reynolds Re et de Prandtl Pr pour la **convection forcée**.
- par l'intermédiaire des nombres de Rayleigh Ra et de Prandtl Pr pour la **convection naturelle**.

Plusieurs corrélations décrivent ces différents types d'écoulement. Les corrélations choisies pour modéliser le panneau PV seront présentées plus loin dans ce rapport. Il est intéressant de savoir que ces corrélations vont être fonction des caractéristiques d'écoulement suivantes :

- Géométrie de l'écoulement :
 - ➔ Diamètre hydraulique ;
 - ➔ Inclinaison ;
 - ➔ Ouvertures sur l'extérieur ;
- Positionnement du chauffage ;
- Ventilation :
 - ➔ Naturelle ;
 - ➔ Forcée.

Dans les cas des panneaux photovoltaïques, en fonction du type de panneau, de l'endroit où il a été installé et de son installation, plusieurs combinaisons différentes des caractéristiques précédentes pourront être rencontrées. Ceci augure d'une grande variété de cas possibles, et aussi d'un grand nombre de corrélations possibles pour la détermination des coefficients d'échange convectif dans les lames d'air.

I.B.3 Modélisation des transferts thermiques radiatifs

La modélisation des transferts radiatifs décrira quant à elle les flux échangés entre différentes parois d'une pièce par exemple. Tout comme la modélisation des transferts convectifs, elle peut être envisagée de plusieurs manières. Deux méthodes couramment utilisées en thermique du bâtiment sont le bilan de flux et la méthode des radiosités [Miranville, 2002]. D'autres méthodes existent [Modest, 2003] [Siegel, 1992] :

- **Méthodes des solutions approchées dans les milieux mono-dimensionnels** : Ces méthodes permettent d'approcher la solution du problème radiatif en posant des hypothèses sur les conditions aux limites du problème (milieu froid, milieu optiquement mince ou épais) ou des hypothèses

d'approximation de la distribution directionnelle de l'intensité du flux radiatif (approximation à deux flux ou méthode des moments).

- **Méthode des solutions exactes dans les milieux mono-dimensionnels gris** : cette méthode donne la solution analytique exacte du problème radiatif. Cependant, elle n'est applicable qu'à certains types de problèmes simples. Les cas possibles sont généralement des conduites cylindriques ou situées entre deux plaques planes parallèles.
- **Méthode des harmonies sphériques** : elle permet d'approcher la solution en transformant l'équation de transfert radiatif en un jeu d'équations différentielles partielles, cette équation étant à la base une équation intégro-différentielle à cinq variables indépendantes (trois coordonnées spatiales et deux directions) très difficile à résoudre. Comme son nom l'indique, la représentation de l'intensité du flux radiatif se fera de manière sphérique. L'avantage de cette méthode est que le jeu d'équations obtenu est beaucoup plus simple à résoudre et que la précision est choisie. Elle est précise dans la modélisation des milieux optiquement minces, mais peut échouer à modéliser les milieux optiquement épais.
- **Méthode des ordonnées discrètes** : comme la méthode précédente, celle-ci transforme l'équation de transfert radiatif en jeu d'équations différentielles partielles. Ici une représentation discrète de la variation directionnelle de l'intensité du flux radiatif est utilisée. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut-être implémentée dans les problèmes de transfert de chaleur ou la solution est obtenue par une méthode de résolution aux volumes finis.
- **Méthode zonale** : elle n'est applicable qu'aux milieux absorbant, émettant et diffusant isotropes. Elle consiste à diviser la cavité étudiée en un nombre fini de zones à surface et volume isothermes. Un bilan de flux est alors établi pour déterminer les échanges radiatifs entre chaque couple de zones au travers de leurs surfaces d'échange. Ceci mène à un jeu d'équations permettant d'obtenir les flux échangés ou les températures.
- **Méthode de Monte Carlo** : cette méthode consiste à utiliser des techniques d'échantillonnage statistique pour résoudre le problème radiatif. Ces techniques d'échantillonnage permettent de prédire de manière statistique le parcours des photons dans le milieu semi-transparent et par conséquent le bilan des intensités de flux dans le matériau. La méthode de Monte-Carlo a l'avantage d'être facilement utilisable même pour des problèmes radiatifs complexes. En revanche, en dessous d'un certain seuil de complexité, il sera plus intéressant d'utiliser d'autres méthodes. En effet, pour des problèmes simples, cette méthode demande beaucoup plus de temps de calcul que des solutions analytiques par exemple.
- **Méthode de tracé de rayon ou "Ray tracing"** : Comme son nom l'indique, elle va consister à tracer le parcours d'un faisceau de lumière dans le milieu semi-transparent et à établir un bilan de flux en fonction de ce cheminement. Elle est utilisée dans la méthode de Monte Carlo pour effectuer le bilan de flux après l'échantillonnage. Mais elle peut aussi être utilisée directement pour obtenir le bilan de flux dans le cadre de certaines hypothèses : par exemple lorsque les coefficients radiatifs du matériau utilisés (absorptivité, transmissivité ou réflectivité) sont moyennées selon la longueur d'onde du rayonnement.

Dans ISOLAB, la méthode simplifiée et la méthode des radiosités sont déjà implémentées. La première consiste à approcher la valeur des flux aux parois par l'intermédiaire de la température radiante moyenne de la pièce. La seconde permet de faire le bilan des flux aux parois de manière exacte. La méthode simplifiée entraîne des erreurs de quelques dixièmes de degrés par rapport à la méthode exacte [Allard *et al.*, 1986].

I.B.4 Assemblage des modèles

Le modèle conductif permet de modéliser le flux thermique au sein d'un matériau solide. Les modèles convectif et radiatif permettent respectivement d'évaluer le flux convectif (I.6) entre un fluide et un solide, et le flux radiatif (I.7) échangé entre une paroi et son environnement (avec les autres parois de la pièce ou avec l'environnement extérieur).

En considérant T_p la température de paroi et T_f la température du fluide, on peut alors écrire la Loi de Newton :

$$\varphi_c = \frac{\phi_{cv}}{S_p} = h_{cv} \cdot (T_p - T_f) \quad (I.6)$$

$$\varphi_r = \frac{\phi_r}{S_p} \quad (I.7)$$

Pour lier ces trois phénomènes, l'équation de la chaleur (I.1) est couplée aux flux surfaciques convectifs et radiatifs.

Avec Φ_{cv} le terme lié aux échanges convectifs, et Φ_r le terme lié aux échanges radiatifs. Ces termes sont déterminés par rapport à l'endroit où l'on se trouve dans la paroi : à l'intérieur ou à la surface d'une couche en contact avec un milieu fluide ou semi transparent (voir Figure I.4).

La Figure I.4 représente une paroi de deux couches et les nœuds de discrétisation de chacune des deux couches. Les nœuds de discrétisation sont issus du choix qui a été fait de présenter le problème de transfert de chaleur mono-dimensionnel de manière nodale. Cette représentation induit un découpage de la couche de matériau en plusieurs sections. Le nombre de sections est fonction du nombre de nœuds choisi pour décrire le transfert de chaleur. Plus ce nombre sera élevé, plus l'évolution de la température au travers du matériau sera mieux connue et mieux le transfert de chaleur sera représenté. En revanche, plus le nombre de nœuds est important, plus le temps de calcul sera également important, le nombre d'équations décrivant le problème augmentant proportionnellement avec ce nombre. Un nœud représentera donc un point précis dans le matériau, et permettra de d'établir l'équation donnant la température en ce point.

En discrétisant l'équation (??) par la méthode des différences finies en chaque nœud de la paroi, un système d'équation la décrivant est obtenu. En appliquant cette méthode à toutes les parois du bâtiment et aux différents systèmes qui y sont liés, ainsi qu'à chaque volume d'air contenu dans le bâtiment, on obtient un système d'équations décrivant le comportement thermique du bâtiment. Pour en faciliter la lecture et la gestion par le code de calcul, ce système d'équation est retranscrit sous forme matricielle (II.55) (cf [Boyer, 1993] ; il est appelé alors système matriciel d'évolution d'état. La matrice décrivant le bâtiment sera donc composée de plusieurs matrices décrivant chaque composant du bâtiment (paroi, volume d'air, etc.) [Boyer, 1993] [Miranville, 2002] [Clarke, 1985]. On essaie, dans la mesure du possible, de rassembler ces composants en zones (pièces) composées de plusieurs inter-ambiances (parois), et on y adjoint les autres composants (VMC, apports de chaleur, etc.).

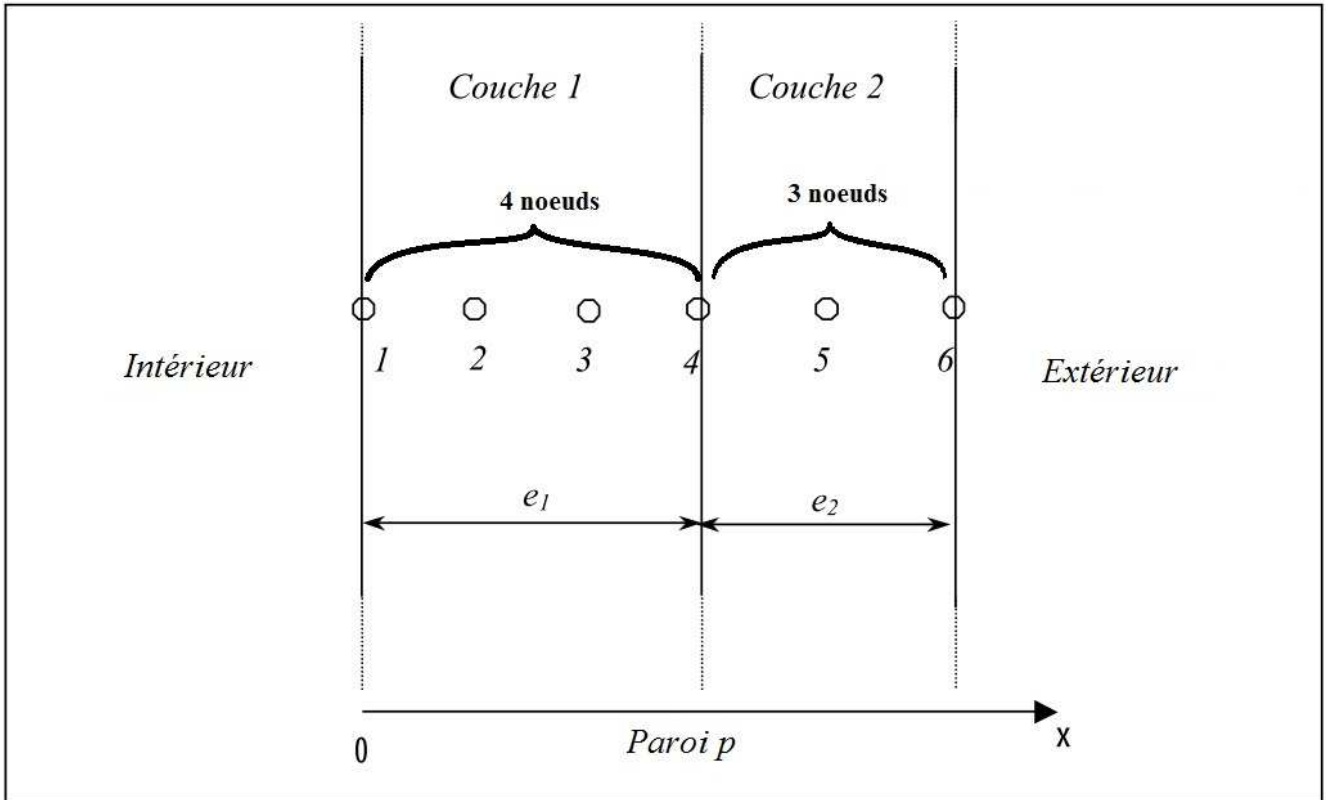


FIGURE I.4 : Exemple de discrétisation d'un mur bi-couche avec quatre et trois nœuds de discrétisation pour chacune des deux couches.

$$[\dot{T}] = [A] \cdot [T] + [B] \cdot [U] \quad (I.8)$$

Après discrétisation, on obtient le système matriciel suivant :

$$[T]^t = [A]_e \cdot [T]^{t+\Delta t} + [B] \quad (I.9)$$

Les matrices $[A]_e$ et $[A]_i$ décrivent la composition des différents matériaux constituant le bâtiment, alors que la matrice $[B]$ correspond aux sollicitations externes ou internes au système. Les matrices $[T]^t$ et $[T]^{t+1}$ contiennent tous les nœuds de températures de toutes les parois du bâtiment, ainsi que ceux des volumes d'air, respectivement aux pas de temps t et $t + 1$ de la simulation numérique. Après implémentation de cette matrice, la résolution peut se faire aisément en inversant la matrice évolution $[A]_e$ (I.10).

$$[T]^{t+\Delta t} = ([A]_i \cdot [T]^t - [B]) \cdot [A]_e^{-1} \quad (I.10)$$

I.B.5 Méthodologie

Cette méthode est couramment utilisée dans le domaine de la physique du bâtiment. Elle consiste à éprouver les modèles numériques décrivant les phénomènes physiques. La méthodologie est constituée de trois parties combinées :

1. Modélisation ;
2. Expérimentation ;
3. Validation.

La première étape, la modélisation, consiste, comme son nom l'indique, à élaborer un modèle mathématique et/ou numérique afin de décrire le phénomène physique étudié. Généralement, le but est de concevoir un outil capable de prédire l'évolution ou l'état du système en fonction des conditions environnementales (météorologie, flux énergétiques ou de matières échangé entre système et son environnement, ou en son sein, etc.). ISOLAB [Miranville, 2002] et CODYRUN [Boyer, 1993] sont des modèles de simulation thermique du bâtiment, mais il en existe d'autres plus connus, tel que ENERGYPLUS [Crawley *et al.*, 2001] ou encore TRNSYS [Beckman *et al.*, 1994].

La deuxième étape, l'expérimentation, consiste à créer un prototype d'installation type du système à étudier. Dans le cas d'un bâtiment, on peut concevoir une version à échelle réduite de bâtiment, un bâtiment type à échelle 1, ou encore utiliser directement un bâtiment fini. Les deux premiers cas permettent d'appréhender le comportement d'un bâtiment type et l'influence de l'ajout ou du retrait de certains de ces composants. Le second sert le plus souvent à vérifier que les objectifs de conception du bâtiment ont été atteints, et donc éprouver les outils et modèles qui ont été utilisés pour le concevoir. En fonction des objectifs de l'expérimentation, des mesures doivent être prises. En ce qui concerne l'étude thermique, les mesures sont généralement les températures des différents composants (parois, volumes d'air, etc.), les flux qui traversent ces différents composants, ainsi que l'humidité des volumes d'air. En fonction des hypothèses, ces mesures peuvent s'appliquer à tout ou partie des composants. De plus, des mesures liées à l'environnement du bâtiment doivent également être prises, telles que la météorologie (rayonnement solaire, vent, température d'air, etc.) ou son exploitation (occupation, équipements, etc.).

La troisième et dernière étape, celle de validation, permet d'éprouver le modèle qui a été créé lors de la première étape, en confrontant les résultats de simulation du modèle avec les mesures prises lors de la phase d'expérimentation. Si la confrontation modèle/mesure donne des résultats satisfaisants, c'est-à-dire que l'écart modèle/mesure est acceptable par rapport aux objectifs de précision, le modèle est validé et considéré comme fonctionnel. Sinon, une séquence d'optimisation du modèle est lancée en identifiant les paramètres qui posent problème et en essayant de les améliorer dans le cas où c'est possible. Si aucun paramètre ne peut être amélioré, la méthode est reprise depuis sa première étape en cherchant à établir un nouveau modèle.

La méthodologie a déjà été appliquée à de nombreux codes de simulation thermique du bâtiment, tel que CODYRUN, ISOLAB ou ENERGYPLUS. Cette méthode a comme principal avantage de donner au concepteur du modèle une vision globale des possibilités et limites de son modèle (ou de son outil), tout en ne perdant pas de vue les objectifs finaux d'installation des différents composants dans ou sur un bâtiment par l'intermédiaire de l'expérimentation.

L'application de cette méthode au cas d'étude de cette thèse sera présentée dans le Chapitre II.A.

I.B.6 Prospection des modèles numériques « commerciaux » ou « libres » existants

Afin de vérifier la pertinence d'ajouter un modèle thermique de panneau photovoltaïque au logiciel ISOLAB, un passage en revue des codes de simulation thermique du bâtiment a été fait en début de thèse (Octobre 2008). Cette prospection a permis d'établir le Tableau I.1 situé plus loin dans la Sous-partie I.C.1 à la page 31 décrivant les différents modèles de panneaux PV existants.

Le constat de cette étude est qu'aucun logiciel existant au début de cette thèse n'était capable de modéliser le couplage thermique entre le bâtiment et le panneau PV. Ce qui veut dire qu'ils n'étaient pas non plus capable d'identifier et de quantifier les interactions entre ces deux systèmes. On subodore à priori que l'ombrage apporté par les panneaux installés en toiture d'un bâtiment va avoir une influence non négligeable sur le confort thermique à l'intérieur de celui-ci. Dans l'autre sens, peut-être que le bâtiment améliorera le refroidissement du panneau et donc son fonctionnement. Les logiciels existants étaient capable de modéliser le bâtiment seul ou le panneau photovoltaïque seul, mais pas l'ensemble des ces deux systèmes couplés l'un à l'autre. Dans certains cas, le couplage électrique du bâtiment et des panneaux était étudié pour une perspective d'intégration de celui-ci dans les meilleures conditions au réseau électrique public.

Ceci posé, il devient alors intéressant d'envisager la création d'un modèle capable de combler cette lacune. En effet, il serait très intéressant de pouvoir modéliser les échanges d'énergies entre le bâtiment et les panneaux PV, pour pouvoir améliorer la conception du bâtiment et optimiser l'installation des panneaux. Un tel outil serait très utile pour atteindre des objectifs de confort thermique dans le bâtiment, pour optimiser la production électrique des panneaux PV, ou trouver le meilleur compromis entre ces deux objectifs quand l'un des deux défavorise l'autre.

I.C DESCRIPTION DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

Cette partie de l'étude bibliographique présente une revue des études qui ont été faites ces dernières années sur les panneaux photovoltaïques ; tant au niveau des modélisations que des expérimentations. Ces deux points seront abordés dans les deux premières sous-parties. La dernière sous-partie quant à elle présentera les études qui ont porté sur l'intégration du panneau photovoltaïque au bâtiment, que ce soit au niveau des outils qui ont pu être mis en place pour évaluer les performances de tels systèmes, des expérimentations menées, ou encore des études de conception effectuées lors de la création de bâtiments à faible empreinte énergétique. Tout ce qui est présenté ici n'est pas exhaustif.

I.C.1 Modélisation de panneaux PV

Dans cette sous partie, des précisions seront données sur la modélisation : sur les modèles thermiques et électriques existants, les principaux résultats de ces modèles, mais surtout les informations intéressantes qui ont pu être retrouvés dans ces études, en ce qui concerne le rendement des panneaux PV et les propriétés optiques des différentes couches constituant le panneau.

I.C.1.a Modèles thermiques

En ce qui concerne la modélisation thermique des panneaux PV, Les modèles convectifs et radiatifs représentent le plus d'intérêts, la modélisation des transferts conductifs au sein du panneau étant généralement la même que pour les parois traditionnelles. En revanche, dès qu'il y a couplage entre le modèle thermique du panneau et le modèle électrique, des particularités apparaissent. Ce point sera abordé dans le Sous-paragraphe I.C.1.c.2 du Paragraphe I.C.1.c p.35.

Dans la Partie I.B.6, un passage en revue de plusieurs codes de simulation thermique ou énergétique du bâtiment a permis de montrer l'utilité de concevoir un code de simulation couplant les comportements du bâtiment et du panneau PV. Ce passage en revue non exhaustif a permis d'aboutir au Tableau I.1 p.31 qui présente les principaux types de modèles utilisés, leurs avantages et leurs inconvénients. Il a également permis d'obtenir le Tableau I.2 p.32, qui fait un inventaire des modèles de transfert convectifs de lame d'air utilisés dans certains des codes passés en revue. Ces deux tableaux sont une bonne représentation de l'état de l'art au début de cette thèse en ce qui concerne la modélisation thermique des panneaux PV.

En regardant de plus près le Tableau I.1 p.31, on constate rapidement les limites des modèles existants :

- Des modèles qui doivent être réévaluer pour chaque cas ;
- La température du panneau photovoltaïque est calculée de manière approximative, ou pas du tout calculée ;
- Les modélisations thermiques du panneau PV et du bâtiment sont découplées.

Le Tableau I.2 p.32 quant à lui, a permis de mettre en avant les différents modèles convectifs utilisés dans les logiciels passés en revue. Souvent, la température de fonctionnement normale d'une cellule est utilisée (NOCT). Il est intéressant de noter que pour les faces extérieures du panneau PV, les relations de convection utilisées traditionnellement dans les codes de simulation sont reprises (Holman pour la convection naturelle et Sturrock pour la convection extérieure). De plus, cette prospection au niveau des modèles convectifs de lame d'air dans les panneau PV a fait apparaître que la modélisation des lames d'air pouvait poser problèmes dans des configurations particulières ; comme lorsque la lame d'air est beaucoup plus longue qu'épaisse ($\frac{e}{L} < \frac{1}{50}$).

I.C.1.a.1 Modélisation convective d'une lame d'air située à l'intérieur d'une paroi PV

De nombreux modèles de transferts convectifs au sein de lames d'air ont fait l'objet d'études depuis l'avènement de l'informatique. Les modèles décrits dans cette partie ont permis d'apporter des connaissances supplémentaires dans le domaine de la convection naturelle dans les lames d'air. Le foisonnement d'études autour de la lame d'air vient du fait que selon la configuration, son comportement thermique et aéraulique peut varier énormément. Dans certaines conditions les écoulements seront laminaires, mais cette même lame d'air pourra avoir un régime d'écoulement turbulent avec des conditions ou des caractéristiques légèrement différentes (flux incident, épaisseur de lame d'air, inclinaison, etc.). De plus, dans beaucoup de cas, le régime est transitoire. Cela amène de nouveaux problèmes, car la plupart des modèles convectifs existants sont construits pour les régime turbulents ou laminaires. La gamme de régimes comprise entre celle du laminaire et celle du turbulent est très souvent difficilement mesurable.

Les conditions à partir desquelles le fluide (l'air généralement) passera de la stratification au mouvement, et vice-versa, sont également difficiles à déterminer dans les lames d'air fines et longues.

Références	Type de modèle	Thermique			Sorties			Avantages	Inconvénients
		Conduction	Convection	Rayonnement	T° de la couche PV seule	T° de toutes les couches PV	Pelec		
[Chenni et al., 2007]	Modèle de panneau PV	Empirique	Empirique	Empirique	oui		oui		La température du panneau est approximative
[Lu et Yao, 2007]	Analyse énergétique des panneaux PV	Méthode nodale à 3 nœuds quelque soit le nombre de couches	Empirique	Type Siegel			oui	oui	Possibilité d'avoir les valeurs des différentes pertes d'énergie Modèle à réévaluer pour chaque cas
[Mattei et al., 2006]	Simple method of energy balance		Empirique	Empirique	oui			Indirectement	Mise en œuvre rapide Modèle à réévaluer pour chaque cas
[Miyasaki et al., 2005]	EnergyPlus (modélisation des fenêtres avec PV intégrés)						oui		Effets sur la consommation électrique du bâtiment Non prise en compte des températures
[Mondol et al., 2005]	Modèle à intégrer à TRNSYS	Empirique	Empirique	Empirique	oui			oui	Modélisations thermique et électrique du bâtiment et des panneaux PV Modélisation thermique découplée du point de vue thermique
[Notton et al., 2005]	L'analogie électrique pour les panneaux PV double verre		Empirique	Radiatif monocouche			oui	oui	Modèle à réévaluer pour chaque cas
[Yang et al., 2000]	Modèle des murs PV		Empirique	Radiatif monocouche	Indirectement	Indirectement		oui	Evaluation de la puissance thermique évacuable par le mur et modèle simple Modèle à réévaluer pour chaque cas
[Bigot et al., 2010a]	Modèle de panneau PV couplé intégré à Isolab	Méthode nodale à 3 nœuds par couches	Empirique	Bilan de flux			oui	oui	Couplage dynamique des modèles thermiques des bâtiments et des panneaux. De plus, le modèle a été construit de manière à être complètement générique La méconnaissance des paramètres radiatifs de certaines des couches du panneau PV oblige un calibrage de ceux-ci pour chaque panneau.
Modèle à réévaluer pour chaque cas : Le modèle n'est applicable qu'au cas étudié lors de sa création									

Tableau I.1 : Comparaison non exhaustive de plusieurs modèles de panneau photovoltaïque.

Références	Type de modèle	Modèle convectif ou relation utilisé(e) pour le calcul de la température du panneau photovoltaïque	Commentaires	Atout particulier
[Chenni et al., 2007]	Simple method of energy balance	$T_{pv} = T_{air} + (NOCT - 20) \times E / 800$	NOCT (Normal Operating Cell Temperature) est calculée pour une vitesse de vent de 1 m/s, une température ambiante de 20 °C et un ensoleillement de 800 W/m ² .	
[Lu et Yao, 2007]	L'analogie électrique pour les panneaux PV double verre	En convection naturelle : $hc = 1,31 \cdot (T_{pv} - T_{air})^{1/3}$ En convection forcée : $hc = 11,4 + 5,7 \cdot V$ pour les surfaces au vent $hc = 5,7$ pour les surfaces sous le vent	La relation de convection naturelle a été déterminée par Holman. Et les relations de convection forcée ont été déterminées par Cole et Sturrock.	Prise en compte de certains types de lames d'air internes au système PV
[Mattei et al., 2006]	Modèle des murs PV	A l'extérieur : $hc = 5,7 + 3,8 \cdot V$ Dans la lame d'air : Laminaire : $Nu = 0,387 \cdot (Gr \times Pr)^{1/4}$ Turbulent : $Nu = 0,120 \cdot (Gr \times Pr)^{1/4}$	La relation pour l'extérieur a été trouvée par Smolec et Thomas dans "Theoretical and experimental investigations of heat transfer in a trombe wall". Alors que les relations pour la lame d'air située entre le mur et le pV ont été trouvées par Suji et Nagano dans "Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer in a vertical plate".	
[Miyasaki et al., 2005]	Modèle de panneau PV	$T_{pv} = 0,0943 \cdot T_{air} + 0,028 \cdot E - 1,528 \cdot V + 4,3$	Cette équation a été déterminée grâce à des mesures expérimentales faites au Japon par TamizhMani dans "Photovoltaic module thermal-wind performance".	
[Mondol et al., 2005]	EnergyPlus (modélisation des fenêtres avec PV intégrés)			
[Notton et al., 2005]	Analyse énergétique des panneaux PV	En convection naturelle ($V < 0,5$ m/s) : $Nu1 = 0,13 \cdot [Ra1^{1/3} - Rac^{1/3}] + 0,56 \cdot (Rac \cdot \sin(\varphi))^{1/4}$ $Nu2 = 0,56 \cdot (Rac \cdot \sin(\varphi))^{1/4}$ En convection forcée : $Nuf = (L / \lambda_{air}) \cdot (2,8 + 3 \cdot V)$	Avec $Nu1$ et $Nu2$, et $Ra1$ et $Ra2$, les nombres de Nusselt et de Rayleigh des faces supérieures et inférieures des panneaux PV. Rac est le nombre de Rayleigh critique et vaut 10^8 . Les relations de convection naturelle ont été déterminées par Fuji et Imura en 1972, alors que la relation de convection forcée a été déterminée par Radziemska en 2003.	
[Yang et al., 2000]	Modèle à intégrer à TRNSYS	$T_{pv} = T_{air} + 0,031 \times E$	Cette relation a été obtenue en utilisant la température NOCT citée plus haut et appliquée ici à l'expérimentation étudiée.	
[Bigot et al., 2010a]	Modèle de panneau PV couplé intégré à ISOLAB	Lame de fluide confinée : [Bejan, 1984] Lame de fluide ouverte : [Daguenet, 1985]	Pour la convection aux limites du panneau (extérieur et intérieur) il a été décidé de réutiliser les modèles validés disponibles dans ISOLAB.	Prise en compte de tous les types de lames de fluide internes au système PV
T _{pv} : température de la cellule photovoltaïque en °C				
T _{air} : température de l'air ambiant en °C				
E : ensoleillement en W.m ⁻²				
hc : coefficient de convection entre une surface plane et un milieu fluide en W.m ⁻² .K ⁻¹				
V : vitesse de vent en m.s ⁻¹				
λ : conductivité thermique en W.m ⁻¹ .K ⁻¹				

Tableau I.2 : Inventaire de différents modèles convectifs associés aux modèles de panneau photovoltaïque du Tableau I.1.

Ces deux phénomènes ont été et sont très étudiés, et font l'objet de recherches tant expérimentales que théoriques.

En 1996, Elsherbiny [Elsherbiny, 1996] a mis en place une expérimentation afin d'étudier l'effet de l'inclinaison de la lame d'air sur le régime d'écoulement, et donc sur l'échange par convection naturelle. Dans son expérience, il a pu mettre en évidence cet effet et a abouti à une relation empirique (I.11) qui donne la valeur du nombre de Nusselt par rapport au nombre de Nusselt pour une inclinaison de 180°

pour un rapport de longueur de la lame d'air de $\frac{L}{e} = 20$. Ce travail a été partiellement complété depuis, mais certains cas et configurations de la lame d'air posent toujours problème.

$$\text{Nu}(\phi) = \text{Nu}(180) + \frac{180 - \phi}{60} (\text{Nu}(120) - \text{Nu}(180)) \quad (\text{I.11})$$

Avec :

$$\text{Nu}(180) = (1 + (0,212\text{Ra}^{0,136})^{11})^{1/11} \quad (\text{I.12})$$

[Awbi et Hatton, 1999] ont quant à eux travaillé sur la convection naturelle des surface chauffées. Plus de précision peuvent être trouvées dans leur article, ou dans la thèse de [Miranville, 2002].

En 2006, [Dimoudi *et al.*, 2006] ont étudié les performances thermiques d'une toiture équipée d'une lame d'air ventilée. L'expérimentation qui a été mise en place permettait d'étudier les performances thermiques de la toiture en fonction de l'épaisseur de la lame d'air, mais aussi en fonction de la présence ou non d'une barrière radiative au sein de la toiture. Il a été démontré qu'en hiver, la toiture ventilée étudiée était aussi performante qu'une toiture équipée d'une isolation conventionnelle.

[Wang et Hamed, 2006] se sont intéressés à l'étude des cavités rectangulaires inclinées, plus particulièrement au mode transitoire du régime d'écoulement en convection naturelle. Dans leur modèle numérique en 2D, il a fait évoluer l'angle d'inclinaison de la cavité et a observé l'évolution du nombre de Rayleigh Ra. Ils ont pu montrer l'existence de plusieurs états possibles en régime transitoire et également que l'existence de ces différents états multiples dépendait fortement de la valeur du nombre de Rayleigh.

En 2008, MSC Software a publié sa dernière version du guide d'utilisation de son logiciel [MSC, 2008]. Ce guide contient de nombreux modèles empiriques de différentes configurations et types de lames d'air que l'on peut rencontrer dans le bâtiment et l'industrie.

[Xamán *et al.*, 2008] ont étudié la convection naturelle en régimes turbulent et laminaire dans une cavité carrée, dont une des faces était du verre. Leur modèle 2D a abouti à une corrélation capable de donner le nombre de Nusselt global pour une cavité où des transferts de chaleur conjugués ont lieu.

[Coussirat *et al.*, 2008] quant à eux ont aussi étudié la convection naturelle, mais dans un double vitrage ventilé. Ils ont utilisé un code CFD² pour implémenter plusieurs combinaisons de modèles radiatifs et convectifs, et ont pu mettre en évidence le meilleur couple de modèles pour son cas d'étude. Seul un couple a pu passer avec succès la validation : le modèle radiatif P-1, et le modèle convectif de groupe de renormalisation k - ε.

En 2010, [Tari, 2010] a étudié de manière spectrale la variabilité du nombre de Nusselt en fonction de l'angle d'inclinaison de la lame d'air à partir d'un modèle de CFD. Il a pu corréler les modèles empiriques existants en observant les valeurs du nombre de Nusselt pour des valeurs critiques d'angles d'inclinaisons en déterminant les flux correspondant. Il a aussi étudié les instabilités qui apparaissent avant et après ces valeurs d'angle critique. Il montre donc que les modèles empiriques existants sont bons pour des inclinaisons variant de 30 à 60°, et précise que pour des angles inférieurs à $\simeq 15^\circ$ ou supérieures à $\simeq 74^\circ$, les valeurs critiques d'angle de l'étude, d'autres régimes apparaissent. Les modèles empiriques ne sont donc plus valables à l'extérieur de la plage formée par ces angles critiques. De plus, il ajoute que pour des valeurs proches de 15°, comme c'est le cas à La Réunion, certains modèles sont moins justes,

2. CFD : Computational Fluid Dynamic

et peuvent entraîner de mauvaises prédictions. Il préconise que pour ces régions, de nouveaux modèles soient mis en place.

Toutes ces études ont permis de comprendre les avantages et les inconvénients des solutions qui ont été choisies par la suite dans la modélisation opérée au cours de cette thèse. Un autre point très important, est qu'il a été mis en évidence que le cas du panneau PV intégré à la toiture, totalement ou en partie, est un cas qui se trouve à la limite de validité des corrélations empiriques existantes. Ceci entraîne, dans certaines configurations, que les modèles choisis ne seront peut-être pas suffisamment efficaces.

I.C.1.b Modélisation des transferts radiatifs en cavités et en milieux semi-transparents en général

Ci-dessous, des modèles radiatifs couramment utilisés et étudiés vont être présentés dans leur application à des cas similaires ou proches de la modélisation qui va être mise en place dans le modèle de panneau photovoltaïque.

En 1986, [Allard *et al.*, 1986] étudient comparativement différents modèles de transferts radiatifs de courte ou de grande longueur d'onde dans une cellule d'habitation. Il met en évidence les modèles les plus adaptés au bâtiment.

En 1996, [Siegel, 1996] met en place un modèle radiatif qu'il résout par la méthode des différences finies implicite. Il étudie quelques cas similaires à ceux rencontrés dans le bâtiment, tels que les vitrages. Son travail porte sur l'étude de matériaux semi-transparents chauffés d'un côté ou de l'autre par un rayonnement incident, et refroidi de l'autre côté par un phénomène de convection.

En 1998, [Siegel, 1998] étudie à nouveau les matériaux semi-transparents. Il présente un résumé des principales équations régissant ce phénomène, ainsi qu'une revue du travail qui a été effectué dans ce domaine. Il présente également les méthodes de résolutions existantes, et les différents cas qui peuvent être rencontrés. Il compare les différents résultats de ces modèles, et les compare à l'expérimentation. Cette comparaison, lui permet de mettre en évidence les forces et les faiblesses des modèles.

En 2002, [Miranville, 2002] modélise le comportement d'un isolant mince réfléchissant installé en toiture. Le modèle radiatif utilisé (méthode des radiosités) est validé grâce à une installation expérimentale à échelle 1 située à La Réunion.

En 2008, [Luo *et al.*, 2008] étendent un modèle de tracé de rayon validé en mono-dimensionnel (1-D) au cas bi-dimensionnel (2-D) dans un milieu semi-transparent. Ils mettent en évidence l'effet des coefficients d'absorption et de l'indice de réfraction sur l'échange radiatif.

[Kim *et al.*, 2008] quant à eux utilisent une méthode d'interpolation des ordonnées discrètes pour modéliser des milieux non-gris ou diffusant dans des cavités rectangulaires en 3-D. Ils appliquent ce modèle à des gaz purs et des mélanges de gaz se rapprochant de l'air. Il démontre l'utilité de ce type de modèle pour l'ingénierie.

En 2009, [Wu, 2009] applique la méthode de Monte Carlo à un milieu avec un indice de réfraction variable. Il démontre la validité de ce modèle, et montre qu'il réagit comme le modèle par ordonnées discrètes. Il étudie aussi l'influence de l'épaisseur optique et du coefficient de diffusion sur la capacité du

matériau à réfléchir et à transmettre un rayonnement. Il observe que la réflectivité augmente et que son incertitude diminue lorsque l'épaisseur optique augmente, que la transmissivité diminue et son incertitude augmente quand l'épaisseur optique augmente et que la réflectivité décroît avec l'augmentation de l'indice de réfraction.

Ces études ne représentent qu'un échantillon de ce qui est fait, et un certain nombre des derniers articles sur ce sujet ont été ajoutés à la bibliographie. Cet état de l'art du sujet a permis de prendre connaissance des dernières avancées, mais surtout a identifié les faiblesses et les forces des différents modèles. Comme pour la modélisation convective, se posait le problème du coût en calcul des différents modèles. Après cette phase de bibliographie, le choix s'est porté sur un modèle de bilan de flux par tracé de rayon ("ray tracing"). Ce choix sera plus amplement détaillé dans le Chapitre II Partie II.C p.66.

I.C.1.c Modèles de panneaux PV

Cette partie passera en revue les différents modèles de panneau PV. Ces modèles peuvent se classer en deux catégories :

1. Les modèles électriques seuls, c'est-à-dire que seul le phénomène de conversion photovoltaïque est pris en compte, généralement par l'intermédiaire de son rendement, et du flux solaire incident ;
2. Les modèles électriques couplés à un modèle thermique.

I.C.1.c.1 Modèles électriques seuls

Ce genre de modèle se veut souvent très simple. Le but est généralement de pouvoir évaluer rapidement la production électrique d'un panneau photovoltaïque. Connaissant le rendement η du panneau, l'équation (I.13) est utilisée pour déterminer la puissance produite. Le rendement quant à lui est donné par le constructeur du panneau PV, il peut faire l'objet d'un ajustement en fonction de la température (cf Sous-paragraphe I.C.1.c.2 p.35). Les modèles électriques simples sont peu précis, mais peuvent être suffisants pour un pré-dimensionnement ou une estimation des coûts.

$$P_{PV} = \eta \cdot E \quad (I.13)$$

Étant donné la faible précision de ce genre de modèle, les recherches s'orientent vers les modèles intégrant l'effet de la température sur le rendement des cellules photovoltaïques (cf Sous-paragraphe I.C.1.c.2).

I.C.1.c.2 Modèles électriques couplés à un modèle thermique

Ce genre de couplage est la plupart du temps fait afin de connaître l'influence de la température du panneau photovoltaïque sur son rendement et donc sur sa production électrique. Le rendement dans les conditions normales d'opération est généralement connu (éclairage de 1000 W.m^{-2} et température extérieure de 25°C). Sa valeur dans les conditions réelles sera calculée en sachant que le rendement diminuera avec l'augmentation de la température (I.14). La diminution sera fonction d'un coefficient de rendement μ_{PV} (en $\%.\text{C}^{-1}$) fourni par le constructeur. Ce coefficient de rendement est négatif.

$$\eta(T) = \eta(T_{\text{NOCT}}) + \mu_{\text{PV}} \cdot (T_{\text{PV}} - T_{\text{NOCT}}) \quad (\text{I.14})$$

Avec $T_{\text{PV}} > 25^\circ\text{C}$.

En 2002, [Zhu *et al.*, 2002] ont développé un modèle mathématique de transfert de chaleur au sein d'un panneau photovoltaïque. Leur modèle utilise la méthode des volumes finis. Ils ont pu montrer que les résistances de contact des différentes couches de matériaux du panneau pouvaient jouer un rôle important dans le transfert de chaleur.

En 2006, [Vaillon *et al.*, 2006] ont étudié l'évolution du rendement d'un panneau PV en fonction de sa température. Pour cela, ils ont utilisé un modèle radiatif couplé à un modèle conductif. L'analyse des données thermiques et électriques a démontré que l'ajustement des conditions radiatives et thermiques du panneau peuvent être de bons indicateurs pour l'amélioration des performances de ce dernier.

En 2007, [Chenni *et al.*, 2007a] utilisent les lois de Kirshoff, l'équation de Shockley et une adaptation de l'équation (I.14) aux courants en jeu dans le panneau PV pour modéliser l'évolution de sa production électrique. Pour déterminer la température de cellule PV, ils utilisent un modèle empirique. Ils appliquent leur modèle à plusieurs technologies de panneaux, comparent les résultats obtenus et démontrent l'efficacité de leur modèle à cinq paramètres. Ce modèle pourra être associé à ISOLAB, et sera donc présenté plus en détail par la suite.

La même année, [Benatiallah *et al.*, 2007] présentent un modèle basé sur le modèle NOCT et implémenté sous environnement Delph5. Ils fournissent les performances électriques de l'installation photovoltaïque, du bâtiment, ou de l'ensemble ou d'une partie de ces deux systèmes. Ils permettent aussi d'optimiser les installations photovoltaïques.

En 2008, [Chao *et al.*, 2008] utilisent le logiciel PSIM pour modéliser une installation photovoltaïque. Leur but est de créer une méthode pour identifier les dysfonctionnements d'une partie de l'installation. Ils valident cette méthode, et précisent qu'elle est facilement implémentable pour prévenir des dysfonctionnements dans de grandes installations, ceci afin de limiter d'éventuels dommages causés par un court-circuit par exemple.

La même année, ils passent en revue les relations existantes les plus pertinentes pour la modélisation de la production électrique d'un panneau PV [Skoplaski et Palyvos, 2008], et proposent une relation empirique [Skoplaki *et al.*, 2008] afin de déterminer la température de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque. Leur modèle peut-être utilisé pour des vitesses de vent $\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$, et pour un rayonnement compris entre 600 et 1100 W.m^{-2} . L'erreur moyenne de prédiction par rapport aux mesures est inférieure à 3°C .

En 2009, [Trinuruk *et al.*, 2009] ont utilisé deux modèles utilisés communément pour prédire la température de cellule de panneaux photovoltaïques intégrés à un bâtiment en Thaïlande. Les modèles utilisés étaient le modèle de Température Nominale de Cellule en Opération (NOCT), et celui du Laboratoire National Sandia (SNL) des États-Unis. Ils ont montré que même si le modèle SNL est plus précis que le NOCT, les deux modèles sont biaisés dans leur prédiction de la température. En calculant la production électrique des panneaux grâce à ces modèles, et en prenant en compte la température du modèle, ils pensaient pouvoir prédire la puissance produite sur une année avec une précision de l'ordre de 6%.

La même année, [Skoplaki et Palyvos, 2009] passent en revue les études qui ont été faites sur la dépendance du rendement photovoltaïque à la température. Ils présentent différents modèles qui permettent de modéliser cette dépendance et discute des avantages et inconvénients de chacun.

I.C.2 Modélisation de bâtiment intégrant des panneaux PV (BIPV)

En 2011, [Zogou et Stapountzis, 2011] ont étudié un bâtiment équipé d'une façade double peau intégrant des panneaux PV. Leur modèle consistait en un bilan des flux d'énergies entrant en jeu dans le système bâtiment. Pour rendre viable économiquement ce type d'installation, ils ont mis en évidence les points suivants :

- l'installation photovoltaïque doit être correctement dimensionnée ;
- les dimensions de la lame d'air derrière le panneau PV doivent être adaptées au bâtiment, et aux conditions climatiques du lieu ;
- l'utilisation de la lame d'air pour des stratégies de refroidissement nocturne ne doit pas être oubliée.

Ils concluent en précisant que de telles installations ne peuvent être rentables et viables que si le bâtiment sur lequel elles sont installées est à faible consommation énergétique.

I.C.3 Validation de modèles PV ou BIPV

En ce qui concerne la validation de modèle, le domaine du photovoltaïque intégré au bâtiment en compte quelques-unes. Dans tous les cas, la démarche est la même que celle présentée pour la modélisation thermique du bâtiment :

- un modèle est créé ;
- une expérimentation type du cas d'étude est mise en place ;
- une comparaison des mesures issues de l'expérimentation et des résultats de simulation est faite, et le modèle est validé ou optimisé en fonction des conclusions de cette optimisation.

Cette partie présente quelques études.

Voici quelques modèles où le couplage du panneau PV est fait avec un système de production de chaleur :

- un collecteur solaire d'eau chaude sanitaire (PV-T) :
 - ➔ [Chow, 2003] ;
 - ➔ [Chow *et al.*, 2006] ;
 - ➔ [Kalogirou et Tripanagnostopoulos, 2006] ;
 - ➔ [Tiwari et Sodha, 2006] ;
 - ➔ [Chow *et al.*, 2007] ;
 - ➔ [Ji *et al.*, 2007] ;
 - ➔ [Joshi et Tiwari, 2007] ;
 - ➔ [Othman *et al.*, 2007] ;
 - ➔ [Tonui et Tripanagnostopoulos, 2007] ;
 - ➔ [Trinuruk *et al.*, 2007] ;
 - ➔ [Chow *et al.*, 2008] ;
 - ➔ [Tonui et Tripanagnostopoulos, 2008] ;
 - ➔ [Anderson *et al.*, 2009] ;

- [Corbin et Zhai, 2010].
- des murs trombes et doubles peaux :
 - [Clarke *et al.*, 1996] ;
 - [Mei *et al.*, 2003] ;
 - [Muresan, 2005] ;
 - [Jiang *et al.*, 2008] ;
 - [Friling *et al.*, 2009b].
- des doubles vitrages :
 - [Notton *et al.*, 2005] ;
 - [Fung et Yang, 2008] ;
 - [Han *et al.*, 2009] ;
 - [Steven et Benjamin, 2010] ;
 - [He *et al.*, 2011].
- ou encore une pompe à chaleur : [Badescu, 2002].

En 2003, [Mei *et al.*, 2003] présentent un modèle de bâtiment intégrant une façade photovoltaïque, et utilisant la lame d'air entre le panneau PV et le mur du bâtiment comme système de préchauffage de l'air pour le bâtiment. Leur modèle est intégré à TRNSYS, et a été validé sur le bâtiment de la librairie Mataro près de Barcelone. Ils montrent que les besoins annuels en climatisation sont légèrement plus importants pour tous les endroits étudiés. Par contre, les besoins en chauffage dépendent énormément de l'endroit où se trouve le bâtiment.

En 2004, [Huang *et al.*, 2004] ont validé un modèle de panneau PV dont la température était régulée par matériau à changement de phase (PCM). Ils ont montré que cette technologie pouvait améliorer significativement le rendement des installations photovoltaïques en façades.

En 2005, [Mattei *et al.*, 2006] présentent un modèle de bilan de flux négligeant les effets radiatifs. Celui-ci permet la prédiction de la température d'opération du module PV et sa production électrique. Une installation photovoltaïque et un module équipé de huit capteurs de température intégrés leur permettent de valider leur modèle.

[Mondol *et al.*, 2005a] utilisent le modèle intégré à TRNSYS pour modéliser une installation photovoltaïque intégrée au bâtiment. Ils étudient surtout la production d'électricité de l'installation PV, et l'efficacité de l'onduleur qui relie l'installation au réseau d'électricité.

En 2007, [Lu et Yao, 2007] modélisent un panneau PV en utilisant un modèle optique paramétrable quelque soit le nombre de couches, et un modèle thermique mono-dimensionnel (1-D) en régime permanent. Ils valident expérimentalement le modèle avec une erreur relative maximale de 8,43% sur la production électrique du panneau. Ils montrent qu'avant 8h et après 16h, beaucoup d'énergie ne peut être converti en électricité à cause des réflexions sur la première couche du panneau. Leur modèle donne également les pertes par réflexion sur le panneau PV, et par transmission dans le semi-conducteur, les pertes convectives, et les pertes radiatives du panneau avec son environnement.

En 2008, [Santbergen et van Zolingen, 2008] ont modélisé le facteur d'absorption de cellules photovoltaïques. Ils montrent qu'en minimisant les pertes réfléchives sur l'ensemble du spectre solaire, on peut atteindre un facteur d'absorption théorique de 93% en entrée de cellule, alors que l'expérimentation donne un facteur maximum de 90,5%.

En 2010, [Yoo et Manz, 2010] ont modélisé un bâtiment équipé de panneaux PV en ombrières. Il a pu montrer que l'utilisation de ce système peut-être un avantage pour l'isolation nocturne, mais pas pour la production d'électricité le jour, car la configuration choisie avait tendance à augmenter la température de fonctionnement des panneaux le jour. Ils en ont donc conclu qu'une étude précise des consommations énergétiques du bâtiment, de la ressource et de la production solaire, ainsi que des objectifs à atteindre devait être menée, afin de trouver le meilleur équilibre entre production d'énergie par les panneaux photovoltaïques et économies énergétiques du bâtiment. Ils ont amélioré leur modèle en 2011 [Yoo et Manz, 2011].

La multitude de modèles de panneau PV semble très importante à l'issue de l'inventaire qui vient d'être présenté. Pour mieux comprendre les raisons de ce foisonnement, il faut s'intéresser sur les caractéristiques particulières des installations photovoltaïques. Celles-ci sont présentées dans la partie qui suit.

I.D CARACTÉRISATION DES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES INTÉGRÉES OU SEMI-INTÉGRÉES

Trois éléments peuvent être pris en compte pour caractériser une installation photovoltaïque :

1. **Le type d'installation et son intégration au bâtiment** : ceci va déterminer la complexité du modèle décrivant le système (types de modèles, couplage, etc.) et les interactions engendrées entre le système bâtiment et le système PV.
2. **Les propriétés optiques du panneau photovoltaïque** : elles vont déterminer sa capacité à transformer le rayonnement solaire en électricité (productible), mais aussi la quantité de chaleur que le panneau transmettra au bâtiment.
3. **Le rendement du panneau et son coefficient de rendement associé** : qui vont déterminer le productible PV.

I.D.1 Typologie des installations photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques peuvent être installés selon plusieurs configurations. Les types d'installations engendrent deux types de panneaux photovoltaïques : ceux opaques, et ceux semi-transparents (verrières et ombrières). En plus des panneaux photovoltaïques simples, il existe des panneaux PV hybrides, dans le sens où le reste d'énergie non converti en électricité du rayonnement solaire est utilisé pour chauffer un fluide (généralement de l'air ou de l'eau). La Figure I.5 p.40 présente les différentes technologies de panneaux PV existantes.

I.D.2 Propriétés optiques d'un panneau PV

La connaissance détaillée de ces propriétés permet de modéliser correctement les flux radiatifs au sein d'une cellule photovoltaïque, et donc de déterminer le rendement de la cellule photovoltaïque. Les propriétés optiques entrant en jeu dans la modélisation sont l'absorptivité (α), la transmissivité (τ) et

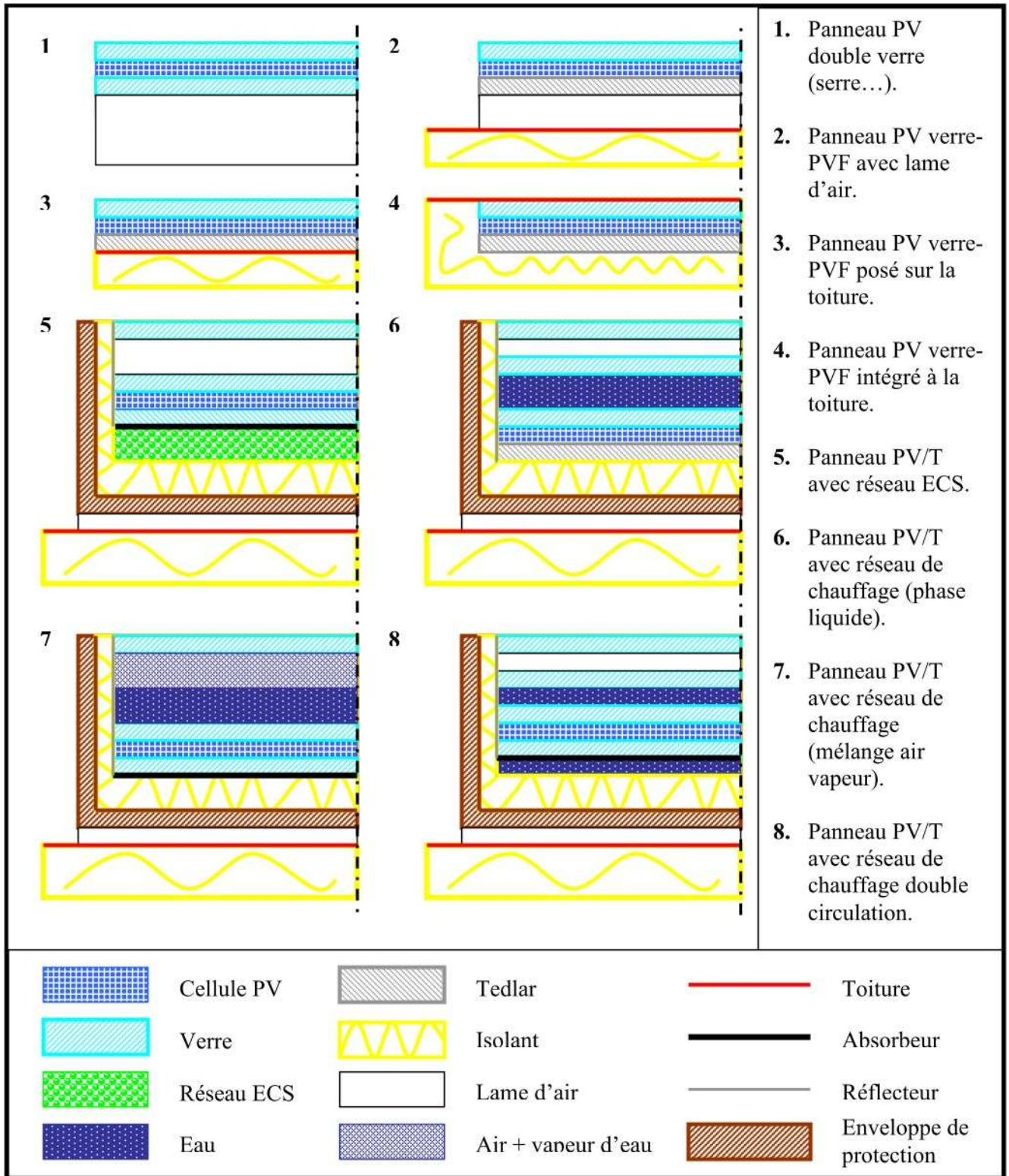


FIGURE I.5 : Coupes transversales de différentes technologies de panneaux photovoltaïques. Source : ADEME.

la réflectivité (ρ). Les valeurs de ces coefficients sont communément admises et varient en fonction du type et de la marque du panneau PV. Cependant, pour des raisons de secrets industriels et de brevets,

Type de matériau	Absorptivité	Transmissivité	Réfectivité
Verre	0.05	0.85	0.1
EVA	0.05	0.85	0.1
Silicium	0.06	0.64 à 0.84	0.1 à 0.3
Aluminium	0.1 à 0.9	0	0.1 à 0.9
Tedlar	0.1 à 0.9	0	0.1 à 0.9
L'EVA (Éthylène-Vinyle-Acétate) emprisonne le semi-conducteur et a un comportement proche de celui du verre. En ce qui concerne l'aluminium et le tedlar, l'état de surface (peinture absorbante ou surface polie réfléchissante) va permettre d'évaluer la valeur des coefficients optiques. Toutes les valeurs données dans ce tableau sont des valeurs moyennées sur le spectre solaire. Toutes ces valeurs ont été récupérées au fil de l'étude bibliographique dans les différents articles et ouvrages lus.			

Tableau I.3 : Propriétés optiques des couches constituant un panneau photovoltaïque en silicium polycristallin (valeurs communément admises à incidence normale).

ces informations ne sont pas fournies par le constructeur. En revanche, l'étude bibliographique a montré qu'il existe des valeurs de ces paramètres admises par la communauté scientifique (cf Tableau I.3 p.41).

Les coefficients optiques varient en fonction de la longueur d'onde et des études sont menées pour essayer de mieux les évaluer. Lorsque l'évolution de ces coefficients en fonction de la longueur d'onde n'est pas prise en compte, on aboutit à une erreur de modélisation plus grande. Sa prise en compte peut donc être une piste d'amélioration du modèle si celui-ci n'est pas suffisamment précis.

Les propriétés optiques d'un panneau photovoltaïque sont fonctions de celles des couches de matériau qui le composent :

- Le type de semi-conducteur (silicium cristallin, matériaux en couches-minces) ;
- Les couches enserrant la couche semi-conductrice Paragraphe I.D.1 (verre, EVA, Tedlar, Aluminium).

Les paramètres qui varieront d'un constructeur à un autre sont essentiellement les états de surface de la couche semi-conductrice et de la couche utilisée comme support et protection en sous-face du panneau PV.

En 2010, [Santbergen *et al.*, 2010] ont étudié le facteur d'absorption des cellules photovoltaïques de type couche mince. Ils ont montré que ce genre de cellule absorbait en grande partie le rayonnement de grande longueur d'onde.

I.D.3 Rendement et coefficient de rendement d'un panneau PV

Les rendements des panneaux solaires photovoltaïques varient entre 6 et 35% pour la production d'électricité (cf Tableau I.4 p.42), ce dernier chiffre étant vrai pour certaines nouvelles technologies et dans des conditions de test optimales obtenues en laboratoire. Cependant, le rendement de conversion photovoltaïque du silicium pur est de 6%. Les rendements plus élevés obtenus dans les panneaux sont possibles grâce aux couches entourant le silicium dans le panneau PV. Ces couches aident à « piéger » la lumière au sein de la couche de silicium afin d'augmenter le nombre de passages de celle-ci dans le silicium. Ceci augmente alors la quantité d'énergie convertie en électricité et donc la production du panneau PV.

De plus, le rendement théorique maximal d'une cellule photovoltaïque est d'environ 40%. Le rendement va diminuer avec l'augmentation de la température, et un coefficient, le coefficient de rendement,

Type de cellule		Rendement des panneaux du commerce (en %)	Rendement maximum atteint en laboratoire (en %)	Avantages	Inconvénients
Silicium cristallin	Monocristallin (sc-Si)	16 à 18	24	Fiable et performant Bonne concordance avec les modèles théoriques	Coût et énergie de fabrication élevés Temps d'amortissement sur l'investissement élevé
	Polycristallin (mc-Si)	13 à 15	18	Fiable et performant Coût en énergie et de fabrication moindre que le silicium monocristallin Recyclage des déchets de l'industrie électronique	Coût de fabrication élevé
Couches minces	Silicium amorphe (a-Si)	6 à 9	11	Faible coût de fabrication Possibilité de fabriquer des cellules semi transparentes	Rendement moins important que les cellules à silicium cristallin
	Cadmium telluride (CdTe)	6 à 8,5	16	Faible coût de fabrication	
	Diséléniure de cuivre et d'indium (CuInSe ₂)	10,2	17,7	Faible coût de fabrication	
	Arsenure de Gallium (GaAs)	25 à 28	>30	Rendement très important	

Tableau I.4 : Rendement, avantages et inconvénients des différents types de cellules photovoltaïques [Muresan, 2005].

Types de modules	sc-Si1	sc-Si2	sc-Si3	pc-Si1	pc-Si2	CuInSe ₂	CdTe	a-Si
Coefficients d'évolution du rendement (%. C^{-1})	-0,496	-0,388	-0,427	-0,401	-0,431	-0,484	-0,035	-0,1

Tableau I.5 : Coefficients de rendements en fonction de la température [Mattei *et al.*, 2006].

va permettre de déterminer cette diminution. Le Tableau I.5 présente des valeurs de ce coefficient pour différentes technologies photovoltaïques rencontrées dans la littérature. Il est à noter que pour la plupart des technologies, la valeur de ce coefficient de rendement est d'environ $-0,5\%.\text{°C}^{-1}$.

I.D.4 Expérimentation PV

Cette partie présente un échantillon des études expérimentales les plus intéressantes, ainsi que les informations qui ont pu en découler.

En 1995, Hirata a étudié la variation de la production électrique en fonction des conditions environnementales. Il a publié deux articles à ce sujet en 1995 [Hirata et Tani, 1995] et en 1998 [Hirata *et al.*, 1998]. Dans le premier, il observe l'influence du spectre solaire sur la production, et dans le second, celle des saisons. Il montre que :

1. Le rendement du panneau varie en fonction des conditions environnementales et saisonnières du site d'installation : par exemple en fonction de la température extérieure ou encore du rayonnement incident ;
2. En été, le rendement peut augmenter de 2 à 7% en fonction du type de cellule. La différence entre 2 et 7 vient d'une augmentation de la température de la cellule due au type de cellule utilisé. L'augmentation entre l'été et l'hiver vient d'un changement dans le spectre du rayonnement solaire incident, car une plus grande part de ce rayonnement devient utilisable par le panneau ;
3. Le rendement du panneau varie en fonction des saisons. Il peut varier de 5% pour des cellules de silicium poly-cristallines à 15% pour du silicium amorphe, et sa puissance produite de 4 à 20%.

En 1997, [Brinkworth *et al.*, 1997] démontrent qu'une diminution de 20°K de la température due à un flux d'air derrière le panneau PV augmente considérablement la production électrique du panneau et diminue les apports de chaleur au bâtiment. Ils étudient l'émissivité des surfaces de la lame d'air et démontrent que, quand elle augmente, le flux récupéré par l'air augmente.

En 1998, [Hirata *et al.*, 1998] présentent la suite des travaux de 1995 [Hirata et Tani, 1995]. Ils confirment les résultats obtenus en 1995, et ajoutent qu'en été, le rendement des panneaux peut augmenter de 2 à 7% par rapport à l'hiver en fonction de la technologie. Ce changement est dû au fait qu'en été une plus grande partie du spectre solaire est absorbable par ce matériau semi-conducteur.

En 1999, [Krauter *et al.*, 1999] présentent un modèle de panneau photovoltaïque intégré en façade de bâtiment capable de produire de l'eau chaude. Ce système permet par la production d'eau chaude ou d'air chaud, de diminuer l'augmentation de température du panneau (de 20°K pour l'eau chaude et de 18°K pour l'air chaud), et par la même d'augmenter son rendement photovoltaïque (de 9% pour l'eau chaude, et de 8% pour l'air chaud).

En 2000, [Miranville *et al.*, 2000] ont étudié l'évolution des performances thermiques d'une paroi composite en fonction des conditions météorologiques. La paroi en question était une toiture à l'intérieur de laquelle était installée un matériau mince réfléchissant (PMR). Ils se sont en particulier intéressés au facteur de transmission solaire de la toiture, c'est-à-dire la capacité de celle-ci à transmettre le flux solaire reçu. Ils ont montré qu'il était intéressant de calculer le facteur de solaire en moyennant la valeur de celui-ci sur la période de 10h à 14h dans une journée, cette période étant la plus critique du point de vue du facteur de transmission solaire. En effet, c'est pendant cette période que les températures des différents éléments de la toiture (tôle, PMR...) atteignait des valeurs extrêmes, jusqu'à 55°C pour la tôle.

En 2002, [Bazilian *et al.*, 2002] ont effectué à une analyse de thermographie infrarouge sur des bâtiments équipés de panneaux PV. Le but était d'apporter des données utilisables pour la création et la validation de modèles.

En 2003, [Malik et Salmi, 2003] présentent une série de tests effectués sur une cellule photovoltaïque en extérieur. Ils mettent en avant les points suivants :

1. Des températures basses permettent une meilleure conversion photo-électrique, et donc un meilleur rendement ;
2. La puissance produite pour un même rayonnement solaire incident diminue avec l'augmentation de la température ;

3. La puissance est réduite quand l'ensoleillement est réduit, mais à un taux différent ;
4. Le rendement in situ d'un panneau peut-être différent de celui donné par le constructeur ;
5. L'utilisation des données météorologiques du site est nécessaire lors du dimensionnement d'une installation ;
6. L'étude d'installation PV doit être faite sur le long terme pour prendre en compte l'effet des saisons ;
7. La littérature rapporte que des changements du spectre dans le rayonnement incident ont un effet non négligeable sur les performances du panneau PV ;
8. Il est recommandé de laisser une lame d'air entre la surface d'accueil et le panneau pour minimiser l'augmentation de température de ce dernier.

[Nagano *et al.*, 2003] ont quant à eux développé un panneau PV mural extérieur. Ils voulaient créer un nouveau système modulaire, à même d'être installé facilement sur des bâtiments. Ils voulaient montrer le double potentiel thermique et photovoltaïque de son système : comme producteur d'électricité, et comme moyen de chauffage en préchauffant l'air extérieur et l'injectant dans le bâtiment. Pour cela, ils ont mené une campagne de mesure pendant l'hiver, en mesurant les flux thermo-aérauliques au niveau de la lame d'air entre panneau et le bâtiment, et la production électrique du panneau PV.

[Ubertini et Desideri, 2003] présentent un bâtiment équipé de panneaux photovoltaïques en toiture. Ce bâtiment est instrumenté de manière à pouvoir mesurer en continu la production des panneaux, le rendement des onduleurs, et les conditions météorologiques. Ces données sont utilisées pour valider un modèle numérique de prédiction de la production électrique de l'installation.

En 2005, [Gxasheka *et al.*, 2005] évaluent les performances électriques de cinq types de technologies photovoltaïques. En menant une campagne de mesure de 17 mois, ils montrent que sauf dans le cas de la technologie des films de silicium (EFG), où de la moisissure apparaît et dégrade les performances, les technologies de Silicium mono-cristallin et poly-cristallin semblent stables au cours du temps.

[Zhai *et al.*, 2005] présentent une étude comparative de deux maisons traditionnelles chinoises équipées en toiture de collecteurs solaires à air. En hiver, le collecteur fonctionne de manière à chauffer la maison. En été, il a un mode de fonctionnement en convection naturelle avec l'extérieur. Une maison est équipée d'un collecteur à simple passage de l'air, alors que l'autre est équipée d'un collecteur à passage double. La comparaison montre que le collecteur à passage double récupère 10% de chaleur en plus que celui à passage simple en hiver, et qu'il est plus efficace en été dans son rôle de protection solaire.

En 2007, [Minemoto *et al.*, 2007] étudient l'impact de la distribution du spectre radiatif et de la température sur la performance des panneaux photovoltaïques amorphes (a-Si), comparé à celui sur les panneaux poli-cristallins (mc-Si). L'expérience montre que la production d'énergie dépend beaucoup de la distribution du spectre pour la technologie a-Si, alors que pour celle mc-Si elle dépend de la température, mais pas de la distribution du spectre.

En 2011, [Dominguez *et al.*, 2011] proposent une étude menée en Californie effectuée sur une installation photovoltaïque installée en toiture. Ils présentent des résultats expérimentaux mettant en évidence l'effet des panneaux solaires photovoltaïques sur le transfert de chaleur à travers la toiture. Cette étude est très intéressante dans le cadre de ce travail de thèse, car elle a mis en évidence un impact de l'installation photovoltaïque sur la température de surface intérieure de la toiture pouvant aller jusqu'à une diminution de 2,5°K de celle-ci par rapport à une toiture non équipée de panneaux PV. Les données de cette étude ont pu être récupérées auprès des auteurs de l'article, et seront utilisées dans le Chapitre IV pour valider le modèle créé sur un bâtiment réel.

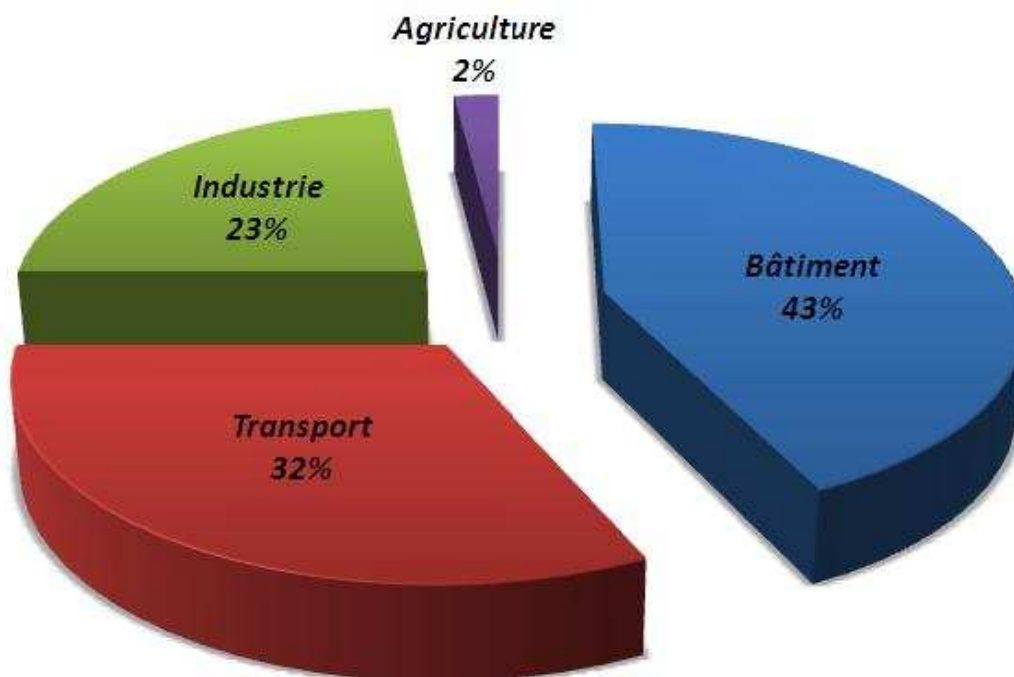


FIGURE I.6 : Répartition de la consommation d'énergie en France par secteurs. *Source : ADEME.*

I.E CONCEPTION DE BÂTIMENTS BIPV

L'énergie et le bâtiment ont toujours été des domaines intimement liés. En France, en 2009, le secteur du bâtiment représente 43 % de la consommation totale en énergie du pays (voir Figure I.6 p.45). C'est la raison pour laquelle le développement durable passe par l'utilisation combinée et réfléchie du panneau photovoltaïque et du bâtiment. Ces dernières années, à La Réunion, des installations photovoltaïques ont été installées sur les toitures de plusieurs bâtiments dans le but de produire de l'électricité surtout destinée à la ré-injection sur le réseau public d'électricité. Ces installations sont la plupart du temps au moins partiellement intégrées, comme sur la photo c de la Figure I.2 p.20. Ce type d'installation offre l'avantage d'utiliser un espace habituellement difficilement exploitable du bâtiment (les toitures, les murs et les vitrages).

En plus de fournir de l'énergie sous forme d'électricité, ces panneaux peuvent aussi contribuer à améliorer l'emprunte énergétique du bâtiment d'une seconde façon : en limitant le flux solaire absorbé par ce dernier. En effet, en absorbant et en réfléchissant une partie du flux solaire incident, le panneau contribue à diminuer la quantité d'énergie reçue par le bâtiment. Dans les régions tropicales humides, comme à La Réunion, ceci a une influence directe sur les besoins en climatisation du bâtiment et donc sur sa consommation électrique.

On comprend mieux alors l'intérêt de concevoir des bâtiments intégrant des panneaux photovoltaïques. Car non seulement il est possible de diminuer la consommation énergétique du bâtiment, mais il est également possible par ce biais de limiter la quantité de gaz à effet de serre issus de la production d'électricité dans le cas où celle-ci provient des énergies fossiles.

Dans ce but, de nombreux outils de conception et de dimensionnement de bâtiments BIPV existent. Une liste non-exhaustive de l'état de l'art à ce niveau est présente dans la Partie D et la Partie E de la Bibliographie. Ces outils ou méthodes sont issus des modèles précédemment présentés.

En 2003, [Bahaj, 2003] a présenté un état de l'art des technologies existantes, et donné quelques recommandations sur l'utilisation des panneaux photovoltaïques en toiture. Entre autre, il conseille de :

- dimensionner le système en fonction des besoins et la région où il se trouve ;
- choisir une installation de qualité et la faire mettre en œuvre par un installateur qualifié ;
- faire attention à la longévité de l'installation et de ses composants ;
- s'assurer de l'intégrité et sûreté de l'installation électrique ;
- éduquer les utilisateurs de l'installation ou occupants du bâtiment.

Cependant, même s'il est évident que l'impact des installations photovoltaïques est rarement négligeable, les logiciels existants au début de cette thèse ne prenaient pas encore en compte l'impact de ces installations sur le confort thermique dans le bâtiment. Or, les interactions entre le bâtiment et le panneau PV peuvent n'avantager que la production photovoltaïque ou que le confort thermique dans le bâtiment. Le type de panneau PV et son installation peuvent avoir des effets totalement différents sur le confort et le productible PV.

Il semblerait donc opportun d'étudier la piste de l'impact de l'installation PV sur le confort thermique dans le bâtiment, c'est pourquoi la partie suivante traite du confort thermique.

I.F CONFORT THERMIQUE

Le confort thermique permet d'évaluer dans quelles mesures un environnement va permettre à un individu de se sentir bien. Il est une notion subjective à chaque individu, et est fonction de cinq paramètres :

1. La température ressentie par l'individu de son environnement ;
2. L'humidité de l'air ;
3. La vitesse de circulation de l'air autour de l'individu ;
4. Le métabolisme de l'individu (dû à son activité) ;
5. La vêtue de l'individu.

De nombreuses études ont été menées pour appréhender cette notion et définir des bases de données statistiques et des paramètres permettant de l'évaluer. Ces études consistait à interroger un grand nombre de personnes dans des conditions environnementales et de vêtue variées. Pour La Réunion, [Miranville, 2002] a mis en place un logiciel, Codyconf, qui permet de tracer le diagramme psychrométrique d'un environnement comme une pièce de bâtiment par exemple (voir Figure I.7). Ce diagramme permet d'évaluer le confort thermique, et fournit des éléments pour améliorer le confort.

Un diagramme psychrométrique est un tracé des points temporels (horaires, à la minute, etc.) de la température ressentie de l'environnement en fonction de son humidité relative. La température ressentie va être fonction de la température de l'air intérieur et de la température radiante moyenne de l'environnement (généralement la température radiante moyenne des parois d'une pièce par exemple ; le calcul de cette température est plus complexe dans le cas où on se situe à l'extérieur). La vitesse de circulation de l'air pourra être prise en compte grâce aux pentaèdres visibles sur la Figure I.7. Ces pentaèdres représentent la zone dans laquelle la sensation de confort sera optimale pour différentes

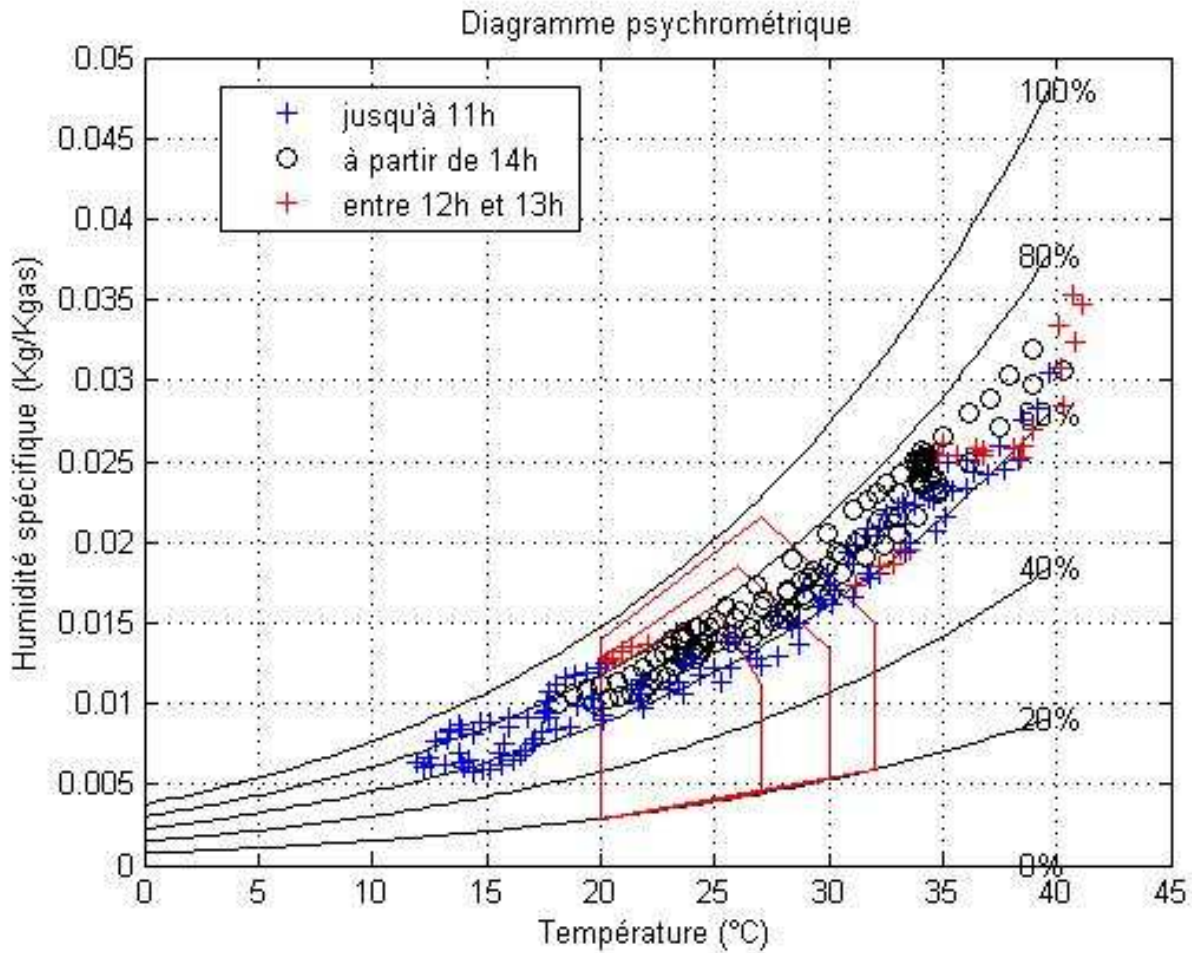


FIGURE I.7 : Exemple de diagramme de confort.

vitesse de circulation d'air. Sur la Figure I.7, les pentagones correspondent, du plus petit au plus grand, aux vitesses d'air de $0,5\text{m.s}^{-1}$, 1m.s^{-1} et 2m.s^{-1} .

Un exemple d'analyse du diagramme de la Figure I.7 serait :

- Tôt le matin, l'environnement semble être trop froid ;
- En milieu de journée, il commence à faire trop chaud, jusqu'au milieu de l'après-midi.

Cette analyse faite, il existe plusieurs moyens pour atteindre les conditions de confort :

- Augmenter la température si il fait trop froid ;
- Diminuer la température et augmenter la vitesse d'air si il fait trop chaud.

A La Réunion, où l'intérêt se porte surtout sur les problèmes de surchauffe de l'environnement, la démarche généralement menée par la suite pour remédier aux problèmes détectés est :

1. **Mettre en place une isolation thermique** adaptée si elle n'existe pas, ou si elle est insuffisante, afin de diminuer l'impact des conditions météorologiques sur le bâtiment ;

2. **Ajouter les brasseurs d'airs** adéquats si les conditions de confort ne sont pas atteintes dès l'étape précédente ;
3. **Avoir recours à des systèmes de climatisation** en dernière solution.

Cette thèse a pour objectif d'intervenir directement à la première étape, en améliorant la protection passive du bâtiment face aux contraintes environnementales. En effet, le but est d'améliorer la protection du bâtiment face au soleil en optimisant l'installation d'un de ces éléments (élément actif pour ce qui est de la production d'électricité mais passif en tant que protection solaire). Ainsi, la température de l'enceinte du bâtiment sera abaissée comparativement à un bâtiment sans protection solaire.

I.G SYNTHÈSE

Dans ce chapitre, les diverses préoccupations qui concernent les panneaux photovoltaïques intégrés ou semi-intégrés aux bâtiments ont été abordées. Une étude bibliographique englobant ces deux champs a été menée afin de mieux appréhender les couplages et interactions pouvant avoir lieu entre un panneau PV et le bâtiment sur lequel il est installé.

Premièrement, le phénomène photovoltaïque a été caractérisé. Pour ce faire, un bref historique du domaine de l'énergie photovoltaïque a été donné et le principe de conversion du rayonnement solaire en électricité a été explicité.

Deuxièmement, le système bâtiment et sa modélisation ont été présentés, ainsi que les différents types de transferts thermiques entrant en jeu dans un tel système. Trois types de transferts de chaleur ont été définis : les transferts conductifs, convectifs et radiatifs. Dans un premier temps, chacun de ces trois transferts a été détaillé au travers des équations les régissant. Dans un second temps, l'assemblage de ces équations a été fait afin d'obtenir le modèle permettant de prédire le comportement thermique du bâtiment dans son ensemble. La méthode de résolution du système d'équations obtenu a alors été expliquée et les hypothèses de résolution données.

Troisièmement, une méthode traditionnelle de validation du modèle a été présentée. Cette méthode constituée de trois parties combinées (modélisation, expérimentation et validation) permet de s'assurer de la justesse du modèle et de le corriger à défaut.

Un passage en revue des logiciels de modélisation thermique de bâtiment existants au début de cette thèse a alors mis en évidence qu'aucun d'eux n'était capable de modéliser le couplage thermique entre le panneau PV et le bâtiment. Les modèles existants permettaient soit de modéliser soit le panneau PV, soit le bâtiment, soit les deux, mais le couplage des deux systèmes n'était pas pris en compte. De plus, cet état de l'art a permis d'évaluer chaque modèle et de mettre en évidence leurs avantages et leurs faiblesses.

Quatrièmement, l'étude bibliographique s'est intéressée aux panneaux photovoltaïques et aux différents transferts d'énergies entrant en jeu dans ce système. Tout d'abord, un état de l'art des modèles existants de transferts thermiques conductifs, convectifs et radiatifs et des modèles électriques a été présenté. Ceci a montré que la plupart des modèles étaient adaptés à des cas particuliers et qu'il était nécessaire de les réévaluer pour chaque type d'installation et/ou d'intégration du panneau sur le bâtiment. Ce problème était dû aux choix faits lors de la mise en place des codes d'utiliser des modèles empiriques

spécifiques pour décrire les trois types de transfert. Ces choix ont eu pour conséquences de limiter les codes de simulation à des cas prédéfinis.

En ce qui concerne les modèles de transferts thermiques convectifs, le choix d'utiliser des relations empiriques pour décrire le phénomène se comprend aisément. En effet, la seule autre option s'avère être les codes CFD, or ceux-ci sont gourmands en temps de calculs et inadaptés aux besoins des bureaux d'études par exemples. En ce qui concerne les modèles de transferts thermiques radiatifs, les choix s'expliquent par la méconnaissance de certains paramètres physiques du panneau PV (propriétés optiques des couches semi-transparentes par exemple). De plus, les modèles empiriques utilisés sont suffisamment précis dans le cadre de la conception d'installations photovoltaïques.

Ensuite, un inventaire des modèles électriques de panneau PV a été fait en différenciant deux types de modèles : avec et sans prise en compte de l'effet de la température sur le productible du panneau PV. Dans le cas de la prise en compte de l'effet de la température, la plupart des modèles utilisés sont des modèles empiriques. Les modèles prenant en compte la température du panneau de cette manière sont plus précis, mais la prédiction de la température est biaisée. En parallèle, d'autres études ont montré que la production d'électricité est fortement liée à la température du panneau et que l'augmentation de celle-ci a un impact négatif sur le productible PV. En moyenne, une augmentation de 1°C de la température du panneau photovoltaïque entraîne une diminution de 0,5% de son rendement.

Puis, des modèles de panneaux PV simples et intégrés au bâtiment ont été inventoriés ainsi que leurs validations respectives. Cet inventaire a montré qu'il existait un grand nombre de modèles tous adaptés à des cas spécifiques, que ce soit pour des vitrages, des panneaux hybrides (PV/T), des murs trombes, etc. Afin de mieux comprendre les raisons pour lesquelles autant de modèles différents existent, une caractérisation des installations photovoltaïques a été présentée. Cette caractérisation s'est décomposée en trois parties : la typologie des installations PV, les propriétés optiques d'un panneau PV et ses rendement et coefficient de rendement.

Enfin, des études expérimentales d'installations photovoltaïques ont été décrites. La plupart s'intéressaient à l'étude du rendement d'un panneau PV, et à l'influence de différents paramètres (spectre solaire, saisons, température d'air extérieure, etc.) sur celui-ci. Ces expérimentations ont principalement confirmé les résultats des modèles, à savoir que l'augmentation de la température du panneau PV entraîne une diminution de son rendement.

D'autres études ont servi de base de données de validation pour des modèles thermo-électriques de panneau PV. Ce qui en ressort, c'est que certaines mesures doivent être disponibles si l'on veut valider correctement le modèle étudié. Les mesures en question sont la température de la face inférieure du panneau PV, les mesures des températures d'air au-dessous et au-dessus de celui-ci (si lame d'air il y a) et son productible.

Cinquièmement, l'intérêt de la conception de bâtiments intégrant des panneaux photovoltaïques (BIPV) a été expliqué : le potentiel d'économie d'énergie et/ou de réduction des gaz à effet de serre a semblé évident. Cependant, les logiciels existants ne permettent pas de modéliser les interactions entre le système bâtiment et le système PV. Or, ces interactions sont primordiales si le but est d'optimiser la conception des deux systèmes afin d'obtenir le meilleur compromis entre production d'électricité et confort thermique dans le bâtiment. Bien sûr ces deux objectifs ne sont pas forcément contraires. A La Réunion, ils coïncident le plus souvent, mais pour des climats plus froids, ils peuvent être opposés.

Dernièrement, un descriptif de ce qu'est le confort thermique a été donné afin de mieux comprendre

l'objectif final du modèle ; à savoir être capable de déterminer si l'installation d'un panneau PV sur l'une des parois du bâtiment va contribuer à améliorer le confort à l'intérieur de ce dernier. A La Réunion, cela permettrait par exemple, soit de minimiser l'utilisation d'isolants traditionnels en toiture, soit de minimiser la consommation des systèmes de climatisations utilisés, ou bien encore tout ou partie de ces deux avantages.

Au vu de tous ces éléments, il a été décidé d'utiliser la méthode de validation présentée. Par la suite seront donc présentés les trois étapes de cette méthode appliquées au cas d'étude de cette thèse, c'est à dire aux parois complexes photovoltaïques intégrées ou semi-intégrées à un bâtiment : à savoir la modélisation du système photovoltaïque couplé au système bâtiment, l'expérimentation de ce système et la validation du modèle.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE ET MODÉLISATION

La modélisation consiste à retranscrire les phénomènes physiques entrant en jeu dans le système étudié de manière mathématique ou physique. Des équations décrivant ces phénomènes sont établies, et résolues afin de déterminer, et même dans certains cas prévoir, une ou plusieurs valeurs représentatives du système.

Dans cette étude, le but est de pouvoir prédire le comportement thermique d'un bâtiment et de son installation photovoltaïque, ainsi que le productible de cette dernière. Pour cela, les phénomènes thermiques et électriques doivent être modélisés. Pour ce faire, plusieurs solutions sont possibles : utiliser un logiciel de modélisation existant de bâtiment BIPV (tel que ENERGYPLUS ou TRNSYS), créer un modèle spécifique de bâtiment BIPV, ou encore créer un modèle de panneau PV et l'adapter à un logiciel de bâtiment existant.

En ce qui concerne la première solution d'utiliser les logiciels existants, l'étude bibliographique a montré qu'ils ne correspondaient pas à nos besoins, étant donné qu'ils ne sont pas en mesure, à l'heure actuelle, de retranscrire le couplage thermique entre le bâtiment et le panneau PV. L'option de créer notre propre modèle de bâtiment BIPV est quant à elle la meilleure solution. Cependant, en imaginant comment créer un tel modèle, il apparaît très vite que la différence par rapport aux modèles de bâtiments existants vient essentiellement de l'ajout d'un nouveau type de paroi complexe. On peut alors tout à fait imaginer compléter un code de simulation existant et lui adjoindre ce nouveau type de paroi.

Dans le laboratoire d'accueil de cette thèse (PIMENT), deux codes de simulation thermique du bâtiment existaient déjà (*CODYRUN* [Boyer, 1993] et *ISOLAB* [Miranville, 2002]) justement adaptés aux climats tropicaux et humides. *CODYRUN* a été développé en langage C alors que *ISOLAB* l'a été sous environnement MATLAB. Le premier est un code, dit spécifique, à destination des bureaux d'études et maîtres d'oeuvre et est vendu par l'Université de La Réunion. Le second est un prototype de code de simulation, plutôt destiné à la recherche et au développement, dans l'optique de valider des modèles qui peuvent ensuite être intégrés à *CODYRUN*. Le principal avantage d'*ISOLAB* réside dans l'environnement d'implémentation MATLAB. Cet environnement facilite grandement l'implémentation, tant au niveau de la gestion des modèles et des fenêtres qui permettent de les utiliser, que des fichiers utilisés pour lancer une simulation. De plus, l'environnement facilite le contrôle et la vérification de l'implémentation des modèles. Ces deux codes ont été validés de deux façons : expérimentalement grâce à des supports expérimentaux et numériquement par la procédure BESTEST [Judkoff et Neymark, 1995].

Au lieu de reconstruire entièrement un code de simulation thermique de bâtiments BIPV, le choix a donc été fait de s'appuyer sur les codes existants dans le laboratoire, et de leur adjoindre un modèle spécifique aux parois complexes photovoltaïques le plus générique possible, du moins en ce qui concerne les panneaux photovoltaïques intégrés et semi-intégrés. Dans cette thèse, le modèle a été au sein d'*ISOLAB*. Plus tard, l'intégration de ce modèle pourra être effectuée au code de calcul *CODYRUN*.

En ce qui concerne le bâtiment, le modèle thermique choisi est donc celui contenu dans *ISOLAB* [Miranville, 2002] (voir Sous-partie I.B.1 p.23). En ce qui concerne le panneau photovoltaïque, une adaptation de ce modèle est faite pour correspondre aux caractéristiques des parois complexes photovoltaïques. Les deux contraintes principales étant la possible présence de lames de fluide dans ce système, ainsi que la présence de couches de matériaux semi-transparentes (verre, EVA, silicium...).

De plus, cette modélisation ne pourra être considérée comme valide seulement après lui avoir fait passer une démarche rigoureuse de validation. Comme indiqué dans l'étude bibliographique la démarche retenue pour cette étude est la méthode combinée modélisation/expérimentation/validation, nommée ci-après « MEV ».

Dans ce chapitre, seront donc présentés la méthodologie retenue, les modélisations des transferts conductif, convectif, radiatif et électrique du panneau photovoltaïque, ainsi que le couplage des différents modèles entre eux et l'intégration au code de simulation thermique des bâtiments *ISOLAB*.

II.A MÉTHODOLOGIE

Comme présenté dans l'étude bibliographique, l'approche combinée modélisation/expérimentation/validation (« MEV ») est une méthode couramment utilisée par la communauté scientifique. Elle permet de concevoir et valider des modèles de comportement physique de systèmes en se basant sur des expérimentations en environnements réels ou contrôlés. Cette méthode est constituée de trois phases : la modélisation, l'expérimentation, et la validation.

Cette partie présentera donc la méthode appliquée à notre cas d'étude, c'est-à-dire l'étude d'un type de paroi complexe active : le panneau photovoltaïque intégré à une paroi de bâtiment. Les trois phases de la méthode seront présentées ci-après et ne seront considérées comme abouties que lorsque le modèle sera validé, ce qui peut nécessiter des itérations successives, permettant de rétro-agir sur le modèle, au départ de résultats de confrontation avec les mesures.

Tout d'abord, la modélisation d'un bâtiment dans les codes de simulation sera décrite et *ISOLAB* sera présenté, ainsi que le modèle de panneau PV qui lui a été ajouté. Les expérimentations possibles sur les supports disponibles au sein du laboratoire seront ensuite listées.

II.A.1 Modélisation d'un bâtiment par un code simulation

Les codes de simulation du comportement énergétique des bâtiments sont développés à l'origine dans l'optique de fournir les moyens d'une caractérisation énergétique d'un ensemble le plus large possible de configurations, le caractère générique fait partie intégrante de leur conception. Cette caractéristique, qui

constitue la principale complexité liée au développement de tels outils, permet en retour une utilisation large, allant de l'étude du profil des températures dans une paroi multicouche à la détermination des consommations énergétiques et des conditions de confort d'immeubles.

Afin de généraliser leur utilisation, les codes de simulation intègrent une approche multi-modèles, dont les avantages sont liés d'une part à une meilleure souplesse du code en fonction des besoins des utilisateurs et d'autre part à des contraintes numériques, liées par exemple au temps de calcul. Une telle caractéristique étoffe là encore le panel des possibilités de modélisation offertes [Boyer, 1993].

Parmi les codes développés, la distinction peut être faite entre les codes autonomes, dits spécifiques, et les codes développés dans des environnements de modélisation. L'un et l'autre possèdent ses avantages et ses inconvénients, mais combinés au sein d'une démarche d'implémentation progressive, effectuée en premier lieu sous une plate-forme de modélisation, puis transposée dans un code spécifique, une complémentarité certaine émerge. En effet, compte-tenu des remarques précédentes, il va sans dire que la somme d'information que doit gérer un code de simulation peut être très importante. L'imbrication de ces informations les unes dans les autres, au gré de la structuration des données de simulation, implique qu'une modification apportée par exemple à un modèle donné peut avoir des répercussions sur un ou plusieurs autres modèles ou modules du code.

A cette difficulté liée à la maintenance et à l'évolutivité s'ajoutent les contraintes numériques, dont la répercussion sur le bon fonctionnement du code peut être fâcheuse. Ainsi, si lors de l'intégration d'un nouveau modèle une phase de test complète peut avoir lieu, afin en particulier de déterminer la meilleure stratégie d'implémentation et de mettre en évidence les éventuelles défaillances du modèle ou de son couplage, l'implémentation définitive au sein du code de calcul est rendue plus aisée.

Compte-tenu de ces éléments, l'extension d'un prototype de code de simulation du comportement énergétique des bâtiments tel que *ISOLAB* semble mieux adapté à nos besoins. Outre la possibilité de répondre à la problématique liée aux parois complexes photovoltaïques, cette démarche s'intègre dans une méthodologie d'équipe, qui en amont de l'intégration au code spécifique, permet de s'assurer de la fiabilité du modèle.

II.A.2 Modélisation d'un bâtiment au sein d'ISOLAB

Cette partie concerne le prototype de code de calcul *ISOLAB*. Ce dernier a été développé sous la plate-forme de modélisation MATLAB, dont un bref descriptif est dans un premier temps effectué. Vient ensuite la description proprement dite du code de calcul, d'un point de vue structurel d'une part et fonctionnel ensuite.

II.A.2.a L'environnement MATLAB

La plate-forme MATLAB est un outil puissant, qui se prête fort bien au calcul matriciel avancé ; le langage de programmation est qualifié de langage de haut niveau et présente de nombreux avantages en termes de syntaxe, gestion des variables et autres fichiers. De plus, le développement de logiciel dans cet environnement est tout à fait facilité, ce grâce notamment à des outils internes de dessin et de gestion de fenêtres, d'un moteur graphique performant et de nombreuses boîtes à outils, classées par

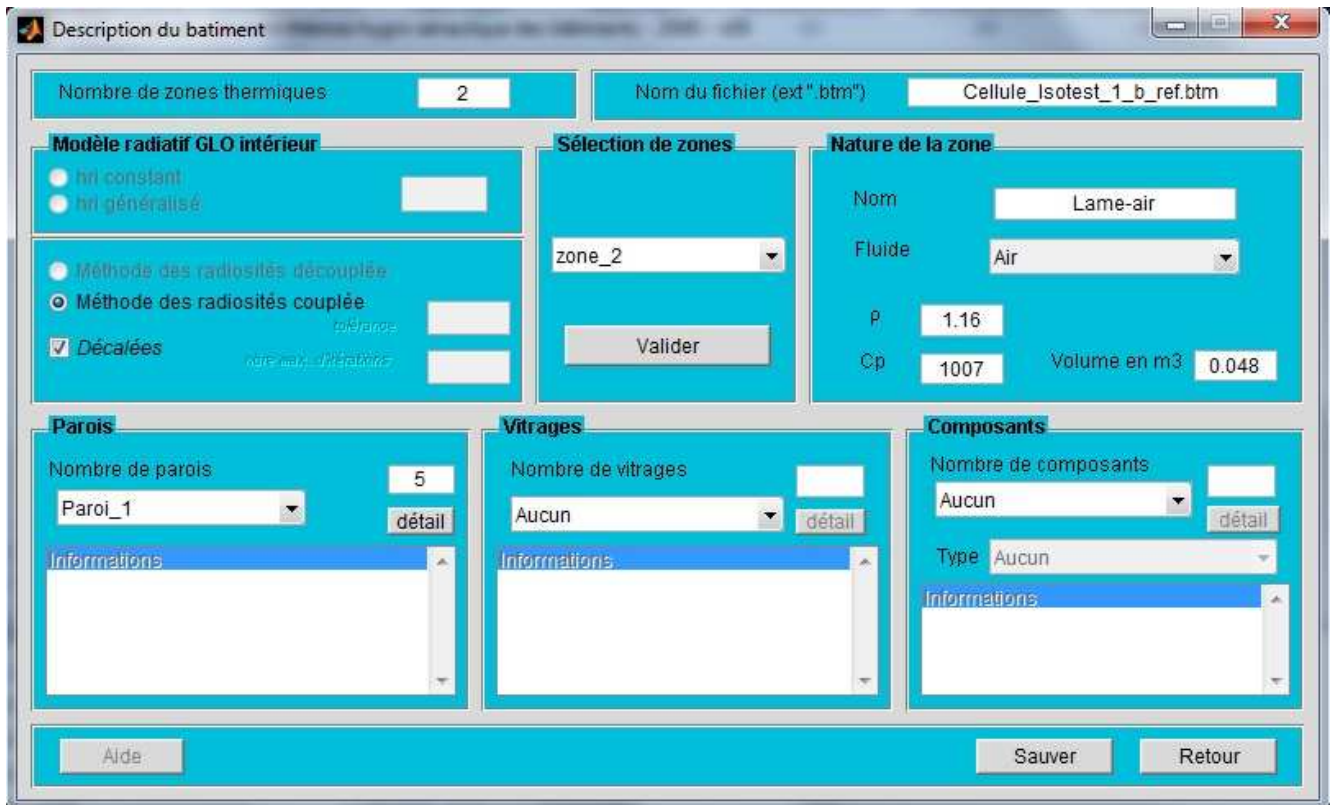


FIGURE II.1 : Fenêtre de description d'un bâtiment dans ISOLAB.

thèmes et permettant à l'utilisateur de s'appuyer sur les travaux de la communauté. L'environnement est complètement intégré et suffit à lui seul au développement optimisé d'algorithmes numériques.

II.A.2.b Présentation structurelle d'ISOLAB

Le code de calcul ISOLAB s'apparente à la classe des codes de simulation détaillées du comportement thermo-hygro-aéraulique des bâtiments et propose les modules suivants :

- Description du bâtiment ;
- Simulation du bâtiment ;
- Tracé de graphiques ;
- Analyse de sensibilité paramétrique ;
- Calcul des indices de confort thermique ;
- Tracé des diagrammes de confort.

La gestion des modules est centralisée dans une fenêtre d'accueil, et l'ensemble des opérations exploite la convivialité du multi-fenêtrage. Les fenêtres de description du bâtiment et de simulation sont visibles respectivement sur la Figure II.1 et la Figure II.2.

A ceux cités plus haut, cette thèse a permis d'ajouter trois autres modules :

- **Description d'une paroi complexe photovoltaïque**, qui est un sous module de celui de description du bâtiment ;
- **Simulation d'une paroi complexe photovoltaïque**, qui est un sous-module de celui de simulation du bâtiment ;

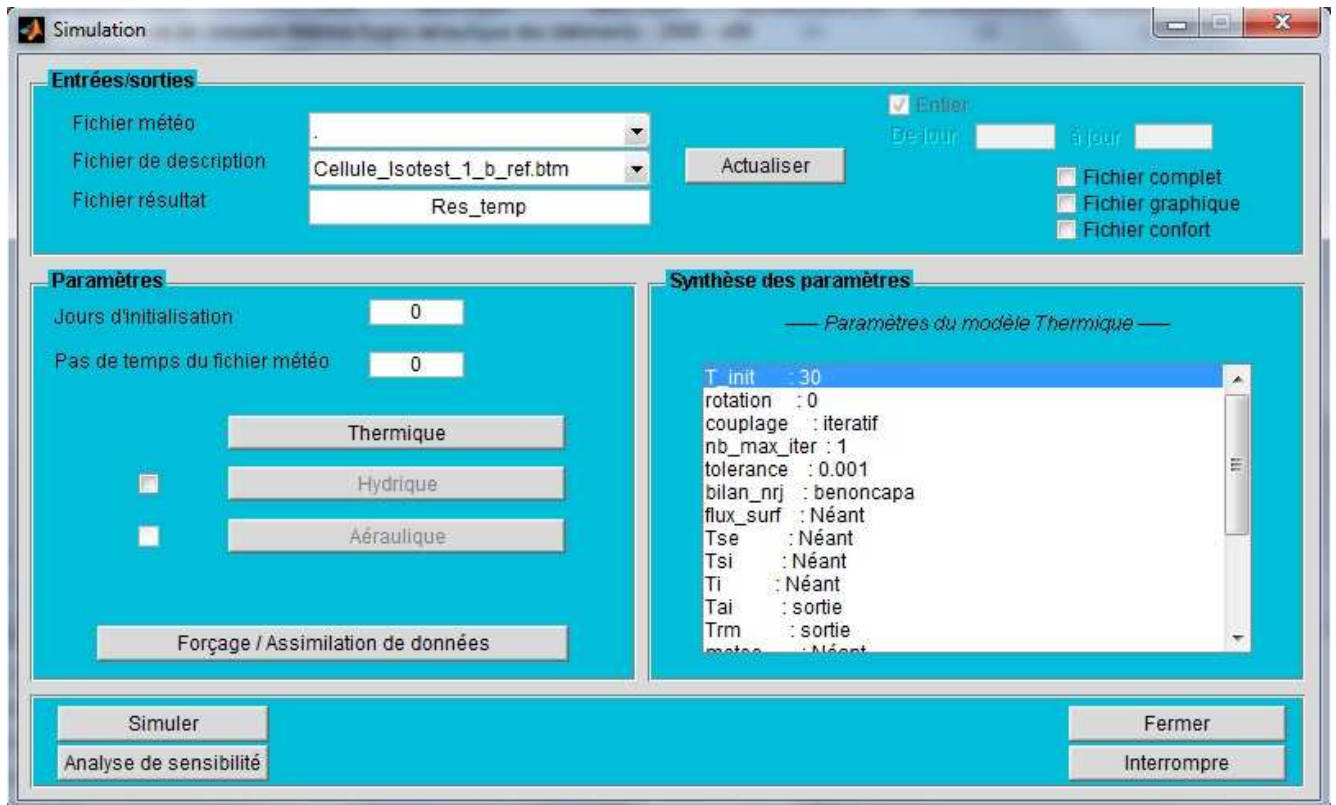


FIGURE II.2 : Fenêtre de simulation d'un bâtiment dans ISOLAB.

– **Création et gestion des séquences d'optimisation couplées au logiciel GenOpt.**

Grâce aux différents modules d'ISOLAB, différentes études peuvent être menées sur un bâtiment. Pour cela il suffit de le décrire par l'intermédiaire du module de description et ensuite lancer l'étude avec le module approprié (simulation, analyse de sensibilité, etc.). Le module de description crée un fichier de description du bâtiment (*.btm) utilisé par le module de simulation pour prédire la l'évolution du champ de température du bâtiment en fonction des conditions météorologiques. Tous les autres modules utilisent les résultats du module de simulation pour effectuer leurs tâches respectives.

L'ajout d'un modèle de parois complexes photovoltaïques consiste donc en la création de deux modules supplémentaires (de description et de simulation d'une paroi complexe photovoltaïque) permettant d'effectuer le couplage des modèles de bâtiment et de panneau PV. Il apparait alors que le modèle de panneau PV tout comme celui du bâtiment devra se présenter sous une forme matricielle manipulable par les modules existants et qui sera ajoutée et couplée à celle du bâtiment.

II.A.3 Principe de modélisation intégrée d'un panneau PV

Pour correspondre aux besoins, le modèle doit être du même niveau de description que celui du code utilisé en référence, en l'occurrence ISOLAB, aussi rapide dans la mesure du possible, et son couplage avec ce dernier doit être intégré. C'est pourquoi le choix a été fait de reprendre le modèle conductif d'ISOLAB déjà utilisé et validé, et de lui adjoindre des modèles convectifs et radiatifs adaptés à la modélisation des panneaux photovoltaïques. En effet, les lames d'air situées en dessous du panneau

photovoltaïque nécessitent l'emploi de modèles convectifs adaptés. Quant au panneau PV lui-même, les premières couches qui le composent sont semi-transparentes et nécessitent un modèle radiatif spécifique.

Les modèles convectifs choisis sont des modèles empiriques ou issus de modèles CFD couramment employés pour la modélisation de ce type de problèmes, c'est-à-dire des problèmes de lame d'air rectangulaires inclinées. Plusieurs modèles ont été retenus afin de pouvoir modéliser le plus de cas possibles.

Le modèle radiatif choisi est un modèle de bilan de flux par la méthode du tracé de rayon ("ray tracing"). Cette méthode a l'avantage d'être suffisamment précise et rapide pour nos besoins et est capable de modéliser correctement les milieux semi-transparentes.

Ces modèles sont détaillés plus loin dans le Chapitre II.

II.A.4 Expérimentation

Afin d'obtenir des données réelles sur les phénomènes thermiques mis en jeu dans les installations BIPV (panneaux photovoltaïques intégrés au bâtiment), des expérimentations ont été mises en place. Les expérimentations ont été menées sur les cellules ISOTEST : des bâtiments à échelle réduite au nombre de 4, situés sur le site de l'IUT de Saint-Pierre (La Réunion).

Ces expérimentations ont permis de mesurer les informations physiques suivantes :

1. Pour le bâtiment :
 - les températures des surfaces des différentes parois du bâtiment et des systèmes étudiés ;
 - les températures des volumes d'air ;
 - les flux traversant les parois.
2. Pour l'environnement du bâtiment (données météorologiques) :
 - la température et l'humidité de l'air extérieur ;
 - l'ensoleillement (décomposé en rayonnements direct et diffus) ;
 - la vitesse et la direction du vent.

L'expérimentation menée durant cette thèse a eu pour but d'étudier de manière comparative plusieurs types de systèmes installés en toiture, afin d'identifier de manière quantitative et qualitative l'impact réel des installations photovoltaïques sur le confort intérieur d'un bâtiment comparativement à d'autres systèmes de protection solaire installés en toiture.

Cette première expérimentation a fourni une première séquence de validation et d'optimisation du modèle de panneau PV.

Une autre étude envisageable sur les cellules ISOTEST consisterait à étudier, toujours de manière comparative, deux installations photovoltaïques similaires, mais avec l'une des deux en état de produire de l'électricité, et l'autre non connectée au circuit de production afin d'identifier une possible influence de la production électrique sur le confort thermique dans le bâtiment.

D'autres expérimentations sont à l'étude pour des échelles plus grande, plus précisément à échelle 1 sur la cellule LGI, et sur bâtiment réel. Ces deux projets font l'objet d'une demande de financement

qui a été labellisée par le pôle de compétitivité Capenergies à travers sa branche locale Témergie (cf. Figure E en annexes p.186). Ces expérimentations auront pour but l'étude thermique plus approfondie des systèmes photovoltaïques installés en toiture et la validation d'un code de calcul en thermique des bâtiments capable de fournir la production électrique de l'installation de manière couplée au bâtiment, et à destination des professionnels de la zone (bureaux d'études, centres de formations, etc.).

II.A.5 Validation

Cette étape finalise généralement l'étude du système. Lorsque que le modèle est validé, cela veut généralement dire que l'on est capable de reproduire son comportement avec le degré de précision souhaité au début de l'étude. La validation consiste donc à comparer le modèle créé avec des données éprouvées. Dans cette thèse, le modèle étudié est un modèle de bâtiment BIPV obtenu par l'ajout à un code de simulation existant d'un nouveau modèle de paroi complexe photovoltaïque. Cet ajout ne change pas le fonctionnement du modèle, mais lui donne encore plus de souplesse.

Les codes de simulation sont constitués de plusieurs modèles dits élémentaires (conductifs, convectifs, radiatifs, etc.). La démarche de validation va donc consister en la vérification des modèles élémentaires, mais également de leur couplage, le modèle de bâtiment pouvant être vu comme le couplage d'une combinaison donnée de modèles élémentaires.

Ainsi, le modèle global ne peut fournir une représentation exacte de la réalité, mais seulement une approximation avec un certain degré de précision. Il convient alors de chercher à déterminer si ce degré de précision est compatible avec des critères de validation donnés, définis en fonction de l'objectif du modèle global et relativement au degré de finesse des modèles élémentaires.

Compte tenu de cette définition, la démarche de validation des codes de calcul est une approche globale dans le sens où elle intègre non seulement la vérification de l'implémentation au niveau du code, mais également l'évaluation de la cohérence des prédictions du modèle global, en fonction de critères prédéfinis et par comparaison à des données issues d'expérimentations. Cette approche est le point de convergence de méthodes de validation élaborées par des équipes de recherches diverses et constitue de ce fait une thématique internationale.

La méthodologie commune de validation au niveau international est issue de deux approches, l'une menée aux Etats-Unis par le N.R.E.L. (National Renewable Energy Laboratory), l'autre européenne, sous l'impulsion de plusieurs universités britanniques, appliquée au programme P.A.S.S.Y.S. (PASSive Solar SYstem Simulation). La méthodologie du N.E.R.L. propose trois parties :

- Vérification analytique ;
- Comparaison inter-logiciels ;
- Validation expérimentale.

Celle du programme P.A.S.S.Y.S. s'en inspire et fait entre autres intervenir une tierce personne pour éliminer tout problème de subjectivité :

- Vérification de la théorie de base des modèles élémentaires par un contrôle extérieur au concepteur du modèle ;
- Vérification des algorithmes numériques ;
- Vérification analytique des modèles élémentaires ;
- Comparaison inter-logiciels ;

- Analyse de sensibilité paramétrique du modèle, en s'intéressant à l'influence des incertitudes des paramètres sur les résultats de simulation ;
- Validation expérimentale en deux parties :
 1. Une analyse de sensibilité non paramétrique qui s'intéresse à l'influence des erreurs des mesures des excitations du modèle ;
 2. Une comparaison modèle/mesures.
- Détermination des intervalles de confiance pour la sortie du modèle ;
- Recommandations et améliorations à apporter au modèle compte tenu des problèmes exhibés par les tests précédents.

Ces deux approches ont inspiré un partenariat franco-anglais, intégrant entre autres E.D.F. (Electricité De France), dont la concrétisation s'est traduite par l'élaboration d'une méthodologie de validation commune :

- Vérification de la théorie de base ;
- Vérification du bon fonctionnement numérique ;
- Comparaison inter-logiciels ;
- Vérification analytique des modèles élémentaires ;
- Analyse de sensibilité paramétrique ;
- Validation expérimentale.

Cette procédure comprend deux parties bien distinctes ; la première, généralement dénommée phase de tests à priori, consiste en une vérification du code de calcul, depuis la théorie sous-jacente aux modèles élémentaires jusqu'à la vérification analytique, en passant par des comparaisons inter-logiciel. Elle a pour objet de s'assurer de l'implémentation correcte des modèles élémentaires et du bon fonctionnement de leur couplage dans le cadre d'un modèle global. Cet aspect de la validation est important et justifie l'élaboration d'outils dédiés, tels la procédure BESTEST [Judkoff et Neymark, 1995]. Cette dernière est essentiellement basée sur la confrontation des prédictions du code de calcul aux résultats de logiciels dits de références, pour un panel de configurations différentes. Elle englobe en conséquence les aspects de vérification du bon fonctionnement numérique et celui de comparaison inter-logiciel et permet de situer le code par rapport à des outils analogues. Si les résultats sont comparables à ceux fournis dans le cadre de la procédure, le code de calcul est alors jugé conforme.

La seconde partie de la méthodologie de validation ou phase de tests à posteriori comporte deux points essentiels, l'analyse de sensibilité paramétrique et surtout la validation expérimentale. Cette dernière est fondamentale, dans la mesure où elle s'attache à confronter les prédictions du code de calcul à la réalité physique des phénomènes, au travers de mesures. En effet, les étapes de vérification précédentes n'ont porté que sur une approche théorique, nécessaire bien entendu, mais non suffisante pour évaluer la validité d'un logiciel. Il ne faut pas perdre de vue que l'action de modéliser est intrinsèquement liée à une réalité physique et il convient en conséquence de s'assurer que cette dernière est bien retraduite. Ce lien est effectué lors de la phase de validation expérimentale, qui est en outre la plus coûteuse, que ce soit en temps ou financièrement. Elle requiert en effet la mise en place d'une expérimentation, dont l'objectif est l'obtention de mesures dites de haute qualité. Elles peuvent alors être utilisées dans le cadre d'une validation expérimentale.

L'analyse de sensibilité de modèle consiste à déterminer l'ensemble des paramètres les plus influents sur une sortie considérée ; à ce titre, elle permet de mettre l'accent lors de la mise en place de l'instrumentation des supports expérimentaux sur les paramètres à mesurer avec précision afin de s'assurer d'une comparaison modèle/mesure fiable. Il est à noter cependant concernant ce point spécifique, que ce n'est pas toujours possible ; en effet, la mesure de propriétés thermo-physiques de matériaux est réalisable de manière précise ; de même des propriétés radiatives peuvent être déterminées avec une précision satisfaisante ; par contre, dans le cas de coefficients d'échanges convectifs notamment, qui interviennent

comme des paramètres de modèles thermiques, il semble difficile de déterminer leurs valeurs par la mesure. En effet, de telles grandeurs sont fortement dépendantes des régimes d'écoulements et des configurations géométriques, ce qui rend la détermination précise d'une valeur non généralisable. En conséquence, pour ce type de paramètre, il convient de se fier aux éléments théoriques et au sens physique, afin de déterminer les valeurs à considérer lors de simulations. Par ailleurs, l'analyse de sensibilité intervient également lors de la recherche de l'origine d'un écart modèle/mesure, et permet de focaliser les recherches vers un ensemble de paramètres restreint, qui gouvernent la sortie considérée.

En outre, la méthodologie de validation expérimentale est fonction de l'objectif de la procédure et du type de sortie considérée; dans notre cas, la validation expérimentale doit permettre de mettre en évidence le bon comportement thermique du modèle d'enveloppe, en particulier au niveau du complexe de toiture. Cet objectif nous a amené à proposer une méthodologie particulière, exposée dans la partie suivante.

II.A.6 Application de la méthode de validation

La Figure II.3 p.60 présente le synoptique de l'approche combinée modélisation/expérimentation/validation, méthode qui a été utilisée pendant cette thèse.

Tout d'abord, une prospection bibliographique est menée sur le système étudié, qui mène généralement à deux types de résultats : un inventaire des méthodes expérimentales et un autre des modèles existants.

Le premier permet de choisir les expérimentations qui peuvent être mises en place dans le cadre de l'étude, ainsi que les informations qui peuvent être recueillies. Cet inventaire permet également de prendre connaissance des « problèmes » qui peuvent être rencontrés pendant l'expérimentation du système étudié et les solutions permettant de les prévoir ou y remédier. Le choix des informations à recueillir se fait parallèlement au choix du modèle décrivant le système, généralement dans le souci de pouvoir valider ce dernier.

Le second inventaire, celui des modèles existants, permet de dresser un état de l'art de ceux-ci et d'évaluer leurs avantages et inconvénients. Un choix peut alors être fait sur l'utilisation des modèles existants ou sur la nécessité d'en concevoir de nouveaux. Les modèles choisis sont alors assemblés selon la description du système et la simulation peut être lancée.

Ensuite, les résultats de la simulation sont comparés aux mesures à l'aide d'outils statistiques. Si le critère de validité du modèle n'est pas respecté, une identification des paramètres les plus influents du modèle est menée grâce à une analyse de sensibilité. Les paramètres identifiés font alors l'objet d'une optimisation.

Si le modèle n'est pas validé, un changement de modèle peut être envisagé et l'étude reprend depuis le choix des modèles. Cependant, dans certains cas, aucun autre modèle n'existe ou ne peut être utilisé. Si cela arrive, il conviendrait de vérifier la précision des mesures qui rendrait peut-être la validation impossible, mais aussi vérifier la bonne implémentation du modèle.

Lorsque le modèle est validé, il peut alors être utilisé dans les limites de ses hypothèses de validation. Dans le cas d'un code de simulation thermique du bâtiment, l'hypothèse qui permet de valider le modèle

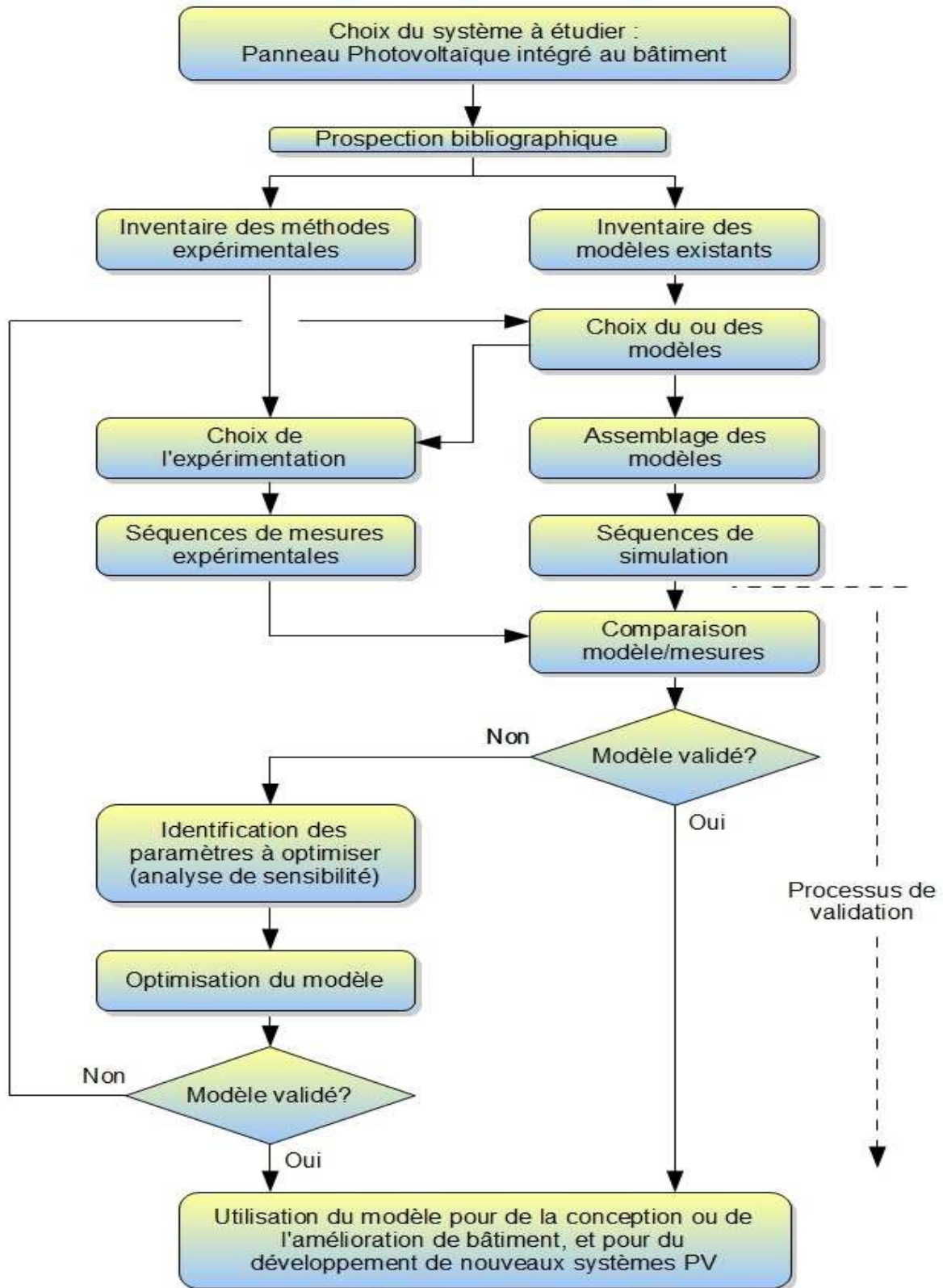


FIGURE II.3 : Synoptique de la méthode combinée modélisation / expérimentation / validation (« MEV »).

est que l'écart modèle/mesures sur la période expérimentée doit être inférieure à 10% de la plage de

variation de la sortie étudiée (température, flux, etc.).

Dans la suite de ce chapitre, les différents modèles de transferts thermiques vont être présentés. L'ordre dans lequel ces modèles sont présentés vient de ce qui a été indiqué auparavant. En effet, il a été expliqué que les modèles convectifs et radiatifs interviennent en conditions aux limites du modèle conductif issu de la discrétisation de l'équation de la chaleur. Vont donc tour à tour être décrits les modèles de transfert convectif, radiatif et conductif, le modèle électrique photovoltaïque, leur couplage et l'intégration du modèle de panneau PV ainsi obtenu au modèle de bâtiment présent dans *ISOLAB*.

II.B MODÉLISATION DES TRANSFERTS CONVECTIFS AU SEIN DU PANNEAU PHOTO-VOLTAÏQUE

La modélisation convective permet de déterminer le flux convectif φ_{cv} échangé entre une paroi solide et un fluide, selon la loi de Newton :

$$\varphi_{cv} = h_{cv} \cdot (T_p - T_f) \quad (II.1)$$

Pour déterminer la valeur de h_{cv} , on utilisera l'équation (I.5) p.24 liant le nombre de Nusselt Nu au coefficient d'échange convectif h_{cv} . La méthode de détermination du nombre de Nusselt variera en fonction du problème et des paramètres suivants :

- Inclinaison de la lame d'air ;
- Ventilation ;
- Confinement ;
- Dimensions (longueur et épaisseur) de la lame d'air.

Il peut exister cinq problèmes de convection dans un système PV installé sur une paroi de bâtiment :

- Sur la face extérieure de la paroi PV (convection forcée induite par le vent) ;
- Sur la face intérieure de la paroi PV (convection naturelle induite par la différence de température entre la paroi et l'air) ;
- Convection forcée dans une lame d'air ouverte ;
- Convection naturelle dans une lame d'air ouverte ;
- Convection naturelle dans une lame d'air confinée ;

Ces cinq problèmes peuvent être décrits grâce à différents modèles empiriques présentés ci-après. On peut noter que dans le cas des lames d'air ouvertes, un couplage peut-être réalisé avec un système de chauffage d'air (séchoir par exemple) ou encore avec une ou plusieurs zones du bâtiment afin de les chauffer (murs Trombe avec injection de l'air réchauffé dans le bâtiment). Pour tous ces modèles, les nombres adimensionnels suivants sont utilisés :

- Le nombre de Rayleigh, $Ra = Gr \cdot Pr$;
- Le nombre de Prandtl, $Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}$;
- Le nombre de Grashof, $Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D^3}{\nu^2}$;
- Le nombre de Reynolds, $Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu}$;
- Le nombre de Graetz, $Gz = Re \cdot Pr \cdot \left(\frac{L}{D}\right)$;

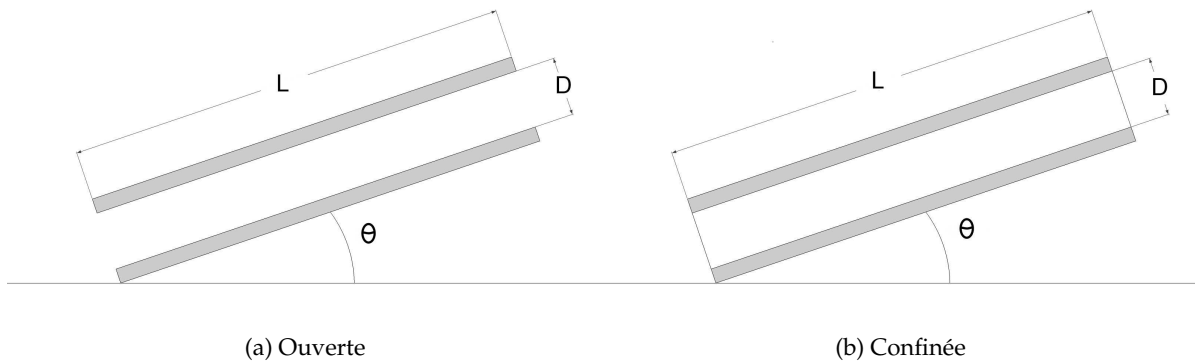


FIGURE II.4 : Schémas en coupe des deux types de lame d'air.

- Le nombre de Nusselt, $Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda}$;
- Le nombre de Stanton, $St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr}$.

La Figure II.4 présente les deux types de lames d'air rencontrées dans un système photovoltaïque installé en paroi. La première présente la lame d'air ouverte aux extrémités dans le sens de l'inclinaison ; cette configuration permet au fluide de circuler et est généralement utilisée dans un souci de refroidissement du panneau PV. La seconde présente une lame d'air confinée.

Remarque : Pour toutes les relations suivantes, les propriétés du fluide doivent être calculées à la température moyenne de son volume T_f , sauf μ_p qui doit être évalué à la température de paroi.

II.B.1 Convection sur les faces extérieure et intérieure de la paroi PV

En ce qui concerne les modèles convectifs extérieurs et intérieurs de la paroi PV, le choix qui a été fait est de reprendre les modèles qui ont fait leurs preuves au cours de l'utilisation d'ISOLAB. Ainsi, la valeur des coefficients d'échanges convectifs sera fournie par ISOLAB, qui les aura calculés à partir de la description de la paroi d'accueil [Miranville, 2002]. Ces valeurs seront calculées selon plusieurs modèles déjà incorporés à ISOLAB.

En ce qui concerne la convection au niveau de la surface intérieure de la paroi PV, les modèles utilisables seront :

- Heat [Fauconnier et Grelat, 1981] ;
- Awbi [Awbi et Hatton, 1999] ;
- Elsherbiny [Elsherbiny, 1996] ;
- Arnold [Chapman, 1974] ;
- Ashrae [Al-Asmar *et al.*, 1996].

En ce qui concerne la convection au niveau de la surface extérieure de la paroi PV, les modèles utilisables seront :

- Sturrock ;
- Ito ;
- Tourrand ;
- Croiset ;
- Laret ;
- Ashrae ;
- Fishenden ;
- Kimura ;
- IUT : ce modèle a été mis en place spécialement dans le cadre des expérimentations menées à l'IUT de Saint-pierre, il se prête bien à certaines conditions de vent, comme les autres modèles empiriques disponibles, il est du type : $h_c = A \cdot V + B$ (où V est la vitesse de vent, et A et B des constantes) ;
- h_{ce} jour/Nuit (un modèle qui considère deux coefficients d'échanges convectifs constants respectivement pour le jour et pour la nuit) ;
- « Tourrock » (une combinaison simple des modèles de Tourrand et Sturrock ; le premier sera utilisé pour des vitesses de vent $\geq 2 \text{m.s}^{-1}$, et le second pour les vitesses de vent plus petites).

Le choix qui a été fait, en ce qui concerne la convection extérieure et intérieure en surface de la paroi PV, s'est appuyé sur un souci de mutualisation des travaux déjà effectués dans le laboratoire, mais aussi sur une volonté de simplification de la description du système PV.

II.B.2 Convection forcée dans une lame d'air ouverte aux extrémités

Les corrélations présentées ci-dessous doivent être utilisées dans le cas où le vent ou une ventilation mécanique engendre un mouvement de fluide de débit connu dans la lame d'air. Elles sont toutes issues de [Daguenet, 1985].

En régime laminaire ($Re < 2100$) :

Si $Gz \leq 100$:

$$Nu = 3,66 + \frac{0,085 \cdot Gz}{1 + 0,047 \cdot Gz^{\frac{2}{3}}} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_p}\right)^{0,14} \quad (\text{Hausen}) \quad (\text{II.2})$$

Si $Gz > 100$:

$$Nu = 1,86 \cdot Gz^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_p}\right)^{0,14} + 0,87 \cdot \left(1 + 0,015 \cdot Gr^{\frac{1}{3}}\right) \quad (\text{Sieder-Tate}) \quad (\text{II.3})$$

En régime de transition ($2100 \leq Re < 10000$) :

$$Nu = 0,116 \cdot \left(Re^{\frac{2}{3}} - 125\right) \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_h}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_p}\right)^{0,14} \quad (\text{Hausen}) \quad (\text{II.4})$$

En régime turbulent ($Re > 10000$) :

$$St = 0,1958 \cdot Re^{\frac{1}{8}} \cdot [5 \cdot Pr + 5 \cdot \ln(5 \cdot Pr + 1) + \frac{0,0326 \cdot Re^{\frac{7}{8}} - 30,59}{0,00435 \cdot Re^{\frac{7}{8}} - 1246,65 \cdot Re^{-\frac{7}{8}} - 1}] \quad (\text{Malik et Buelow}) \quad (\text{II.5})$$

Remarque : On négligera le terme correctif $\left(\frac{\mu_f}{\mu_p}\right)^{0,14}$ si la différence de température $T_f - T_p$ est inférieure à 50°C . L'erreur commise sur le nombre de Nusselt due à cette approximation sera inférieure à 1,5%.

De plus, l'effet du vent doit être pris en compte pour connaître la vitesse du fluide dans la lame d'air (voir Annexes - Partie F). Il faut également prendre en compte les pertes de charge régulières dans la lame d'air, la prise en compte de ces pertes charges est décrite en Annexes - Partie G.

II.B.3 Convection naturelle dans une lame d'air ouverte aux extrémités

La convection naturelle en lame d'air ouverte apparaît pour des vitesses de vent nulles (ou suffisamment faibles pour que les phénomènes convectifs naturels prennent de l'ampleur) et quand il n'y a pas de ventilation mécanique de la lame d'air. Ce cas est très improbable dans les cas réels étudiés dans cette thèse. En effet, l'étude s'intéresse aux lames d'air ouvertes sur l'extérieur, et les mouvements de fluides qui y ont lieu dépendent donc du vent extérieur qui n'est jamais complètement nul. Le problème se ramène donc à la Sous-partie II.B.2 p.63.

Dans le cas d'un couplage avec un autre système, la lame d'air fonctionne de la même manière qu'un thermosiphon et il faut alors utiliser des modèles spécifiques. Le problème est qu'il existe quasiment un modèle empirique pour chaque cas. Il faudrait donc définir pour chaque système le modèle adéquat. Cette solution quoique possible n'est pas implémentée dans le code à l'heure actuelle, le modèle de la lame d'air étudiée n'existant pas. En effet, dans les modèles existants, l'inclinaison et le rapport de longueur de la lame de fluide ne concordent pas avec les modèles existants.

Pour définir les corrélations adéquates, deux méthodes sont possibles, l'expérimentation ou l'utilisation de codes de simulations CFD. Des modèles issus de ces méthodes sont actuellement en cours de définition dans plusieurs laboratoires dans le monde et pourront faire l'objet de futures études le cas échéant. En attendant que ces recherches portent leurs fruits et fournissent des modèles simplifiés ou empiriques permettant de modéliser correctement les phénomènes de convection naturelle, présents dans le cas des thermosiphons par exemple, la seule solution de modélisation disponible est l'utilisation de codes de simulation CFD. Cependant ce genre de codes ne convient pas aux impératifs de rapidité et de traitement générique des codes de simulation des bâtiments.

Bien sûr, lors de futures études, si des modèles existants permettent de décrire les problèmes de convection naturelle en lame d'air rencontrés, ils seront implémentés dans le code. De par l'étude bibliographique qui a été menée, certains modèles ont été identifiés comme suffisamment fiables pour

la prédiction de certains de ces cas, comme par exemple le cas du mur trompe photovoltaïque dans certaines conditions d'inclinaison (mur vertical) et de rapport de longueur de lame d'air.

II.B.4 Convection naturelle dans une lame d'air confinée

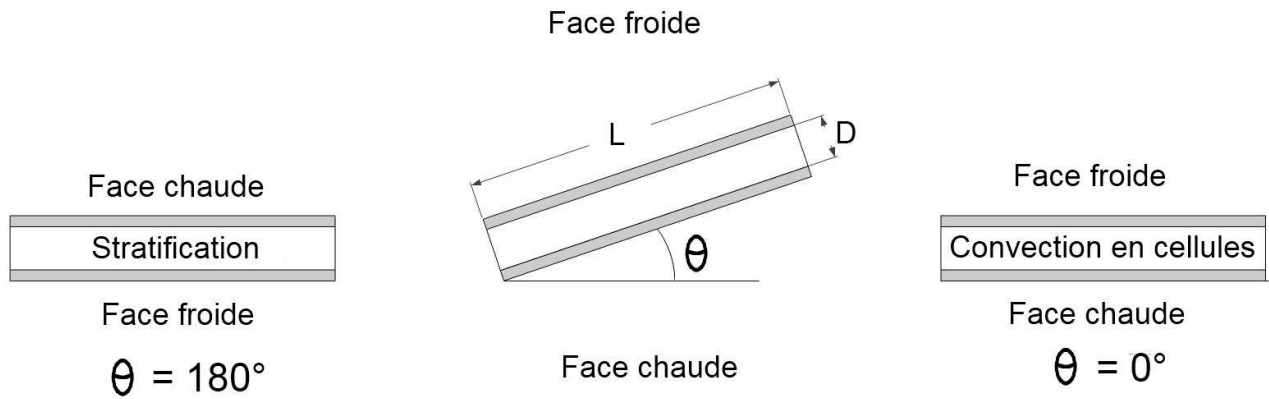


FIGURE II.5 : Géométrie type du problème de convection d'une lame d'air confinée inclinée.

La Figure II.5 présente la totalité des cas de convection naturelle rencontrés dans une lame d'air confinée. Pour $0^\circ < \theta < 90^\circ$, la face chaude de la lame d'air est positionnée sous la cavité, et inversement pour $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$. [Bejan, 1984] explique en se basant sur le travail de [Arnold *et al.*, 1976] que « l'angle d'inclinaison θ a un effet important sur les transferts de chaleur et de masse dans la cavité. Avec la diminution de θ de 180° à 0° , le mécanisme de transfert de chaleur bascule successivement de la conduction pure à $\theta = 180^\circ$, à une cellule de convection unique à $\theta = 90^\circ$, et finalement à la convection de Bénard à $\theta = 0^\circ$. Le nombre de Nusselt de référence $\overline{Nu}_L = \overline{q''}D/(\lambda\Delta T)$ augmente d'un niveau de conduction pure $\overline{Nu}_L(180^\circ) = 1$ à un maximum pour $\theta = 90^\circ$. Avec la diminution de θ en dessous de 90° , le nombre de Nusselt diminue et passe par un minimum local à un angle d'inclinaison particulier θ^* qui est fonction de longueur de la cavité (D/L) ». Les valeurs de θ^* sont données dans le Tableau II.1 p.65.

D/L	1	3	6	12	>12
θ^*	25°	53°	60°	67°	70°

Tableau II.1 : Angle d'inclinaison θ^* du minimum local du nombre de Nusselt de référence en fonction du rapport de longueur de la cavité.

Avec θ diminuant en dessous de θ^* , le nombre de Nusselt atteint un nouveau maximum qui correspond au régime de convection de Bénard : $\overline{Nu}_D = (0^\circ)$. Les différentes phases d'évolution du nombre de Nusselt en fonction de l'angle d'inclinaison de la cavité [Bejan, 1984] sont données par les relations suivantes :

Pour $\theta = 0^\circ$:

$$\overline{Nu}_D(0^\circ) = 0,069 \cdot Ra_D^{\frac{1}{3}} \cdot Pr^{0,074} \tag{II.6}$$

Pour $\theta = 90^\circ$:

$$\overline{\text{Nu}}_D(90^\circ) = 0,25 \cdot \text{Ra}_D^{\frac{2}{7}} \cdot \left(\frac{H}{L}\right)^{\frac{1}{7}} \quad (\text{II.7})$$

Pour $180^\circ > \theta > 90^\circ$:

$$\overline{\text{Nu}}_D(\theta) = 1 + [\overline{\text{Nu}}_D(90^\circ) - 1] \cdot \sin \theta \quad (\text{II.8})$$

Pour $90^\circ > \theta > \theta^*$:

$$\overline{\text{Nu}}_D(\theta) = \overline{\text{Nu}}_D(90^\circ) \cdot (\sin \theta)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{II.9})$$

Pour $\theta^* > \theta > 0^\circ$ et $\frac{D}{L} < 10$:

$$\overline{\text{Nu}}_D(\theta) = \overline{\text{Nu}}_D(0^\circ) \cdot \left[\frac{\overline{\text{Nu}}_D(90^\circ)}{\overline{\text{Nu}}_D(0^\circ)} \cdot (\sin \theta^*)^{\frac{1}{4}} \right]^{\frac{\theta}{\theta^*}} \quad (\text{II.10})$$

Pour $\theta^* > \theta > 0^\circ$ et $\frac{D}{L} > 10$:

$$\overline{\text{Nu}}_D(\theta) = 1 + 1,44 \cdot \left(1 - \frac{1708}{\text{Ra}_D \cdot \cos \theta}\right)^* \cdot \left[1 - \frac{(\sin(1,8\theta))^{1,6} \cdot 1708}{\text{Ra}_D \cdot \cos \theta}\right]^* + \left[\left(\frac{\text{Ra}_D \cdot \cos \theta}{5830}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right]^* \quad (\text{II.11})$$

Toutes les équations précédentes sont valables pour un nombre de Rayleigh Ra_D calculé en fonction de l'épaisseur D de la lame d'air :

$$\text{Ra}_D = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (\text{II.12})$$

Dans les équations (II.10) et (II.11), les quantités entre parenthèses avec un astérisque, $(.)^*$, doivent être mises à zéro si elles deviennent négatives. Les relations (II.8) (II.9) (II.10) et (II.11) ont l'avantage de couvrir toutes les possibilités de configuration d'une lame d'air confinée.

II.C MODÉLISATION DES TRANSFERTS RADIATIFS AU SEIN DU PANNEAU PHOTO-VOLTAÏQUE

La modélisation des transferts radiatifs au sein du panneau PV va définir la manière dont le rayonnement solaire va être distribué dans le matériau semi-transparent (Figure II.6).

La Figure II.6 montre bien la complexité des échanges radiatifs à travers les matériaux semi-transparents. Ces types de matériau sont caractérisés du point de vue radiatif par les trois coefficients α , τ et ρ , qui sont respectivement les coefficients moyens d'absorption, de transmission et de réflexion du matériau.

Ce qui rend complexe la modélisation de ce type de système, c'est l'inter-réflexivité des couches entre elles. En effet, il est à noter, en suivant un rayon de lumière, que celui-ci peut entrer en partie dans le bilan énergétique de toutes les couches du système.

Ce problème peut être résolu en utilisant une méthode de bilan de flux par tracé de rayon (ou « ray tracing »). Cette méthode est couramment utilisée dans les problèmes radiatifs. Elle n'est pas forcément la plus précise, mais dans notre cas, elle apporte suffisamment de précision et d'informations pour pouvoir décrire correctement les phénomènes mis en jeu. De plus, elle a l'avantage de converger assez vite.

Le principe va consister à « suivre » le rayon de lumière, en faisant l'hypothèse que la lumière se propage infiniment plus vite que la chaleur et à répartir pas à pas ce rayon de lumière dans les différentes couches de notre système. La répartition s'arrêtera lorsque l'erreur choisie sera atteinte.

A la première itération de notre répartition, l'énergie du rayon incident sera répartie dans chaque couche, en calculant étape par étape les énergies absorbées, transmises et réfléchies par couche. Aux itérations suivantes, le même procédé se répète en répartissant le reste non réparti de l'énergie de l'itération précédente. Lorsque la différence entre les restes non répartis des énergies de deux itérations successives est inférieure à l'erreur choisie, la répartition est terminée.

Un système d'équations est obtenu (cf (II.21) à (II.26)) pour M couches semi-transparentes dans le système photovoltaïque et pour le nombre I d'itérations nécessaires à la convergence du modèle ; l'indice m représentant le numéro de la couche, et l'indice i le numéro d'itération de notre répartition.

Remarque : La surface de la couche M+1 est opaque, et peut être considérée comme proche de celle d'un corps noir (cas d'un absorbeur avec $\alpha = 0,95$, $\rho = 0$, $\tau = 0$ et $\epsilon = 0,95$), comme un corps gris à émission diffuse (avec $\alpha = \epsilon$, $\rho > 0$, et $\tau = 0$), ou comme un matériau réfléchissant (avec $\alpha \geq 0$, $\tau = 0$, $\epsilon \geq 0$ et $\rho > 0$).

Soit $\phi_{abs}^i(m, 1)$ le flux absorbé par la couche m à l'itération i sur sa face extérieure, et $\phi_{abs}^i(m, 2)$

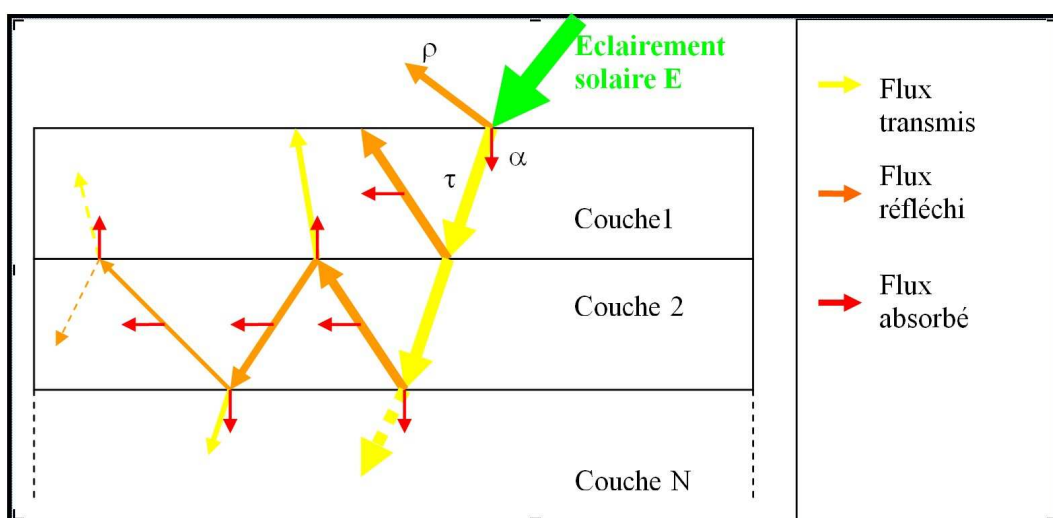


FIGURE II.6 : Schéma représentant les phénomènes de réflexion dans un milieu multi-couche semi-transparent [Siegel, 1992].

le flux absorbé sur sa face intérieure ; $\phi_{\text{trans}}^i(m \rightarrow n)$ le flux transmis à la couche n par la couche m à l'itération i , et $\phi_{\text{ref}}^i(m \rightarrow n)$ le flux réfléchi par la couche m vers la couche n à l'itération i .

Notre problème peut alors être décrit comme suit :

- Conditions initiales :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{abs}}^1(1,1) = E \cdot S \cdot \alpha_1 \cdot F_{pe} \end{array} \right. \quad (\text{II.13})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{trans}}^1(1 \rightarrow 2) = E \cdot S \cdot \tau_1 \cdot F_{12} \end{array} \right. \quad (\text{II.14})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{trans}}^1(M+1 \rightarrow M) = \epsilon_{M+1} \cdot \sigma \cdot S \cdot T_{M+1}^4 \cdot F_{M+1,M} \end{array} \right. \quad (\text{II.15})$$

Avec F_{pe} le facteur de forme entre le panneau PV et l'extérieur et F_{12} le facteur de forme entre la couche 1 et la couche 2. Les couches du panneau ayant la même surface, on a $F_{12} = 1$. E correspond au rayonnement solaire global incident sur le panneau photovoltaïque.

- Conditions aux limites : Pour $2 \leq i \leq I$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{abs}}^i(1,2) = \phi_{\text{abs}}^{i-1}(1,2) + (\phi_{\text{ref}}^{i-1}(2 \rightarrow 1) \\ \quad + \phi_{\text{trans}}^{i-1}(2 \rightarrow 1)) \cdot \alpha_1 \cdot F_{21} \end{array} \right. \quad (\text{II.16})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{trans}}^i(M+1 \rightarrow M) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.17})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{trans}}^i(1 \rightarrow 2) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.18})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{ref}}^i(1 \rightarrow 2) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.19})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{ref}}^i(M+1 \rightarrow M) = (\phi_{\text{trans}}^{i-1}(M \rightarrow M+1) \\ \quad + \phi_{\text{ref}}^{i-1}(M \rightarrow M+1)) \cdot \rho_{M+1} \cdot F_{M+1,M} \end{array} \right. \quad (\text{II.20})$$

- Description des phénomènes radiatifs : Pour $2 \leq i \leq I$ et $2 \leq m \leq M$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{abs}}^i(m,1) = \phi_{\text{abs}}^{i-1}(m,1) + (\phi_{\text{ref}}^{i-1}(m-1 \rightarrow m) \\ \quad + \phi_{\text{trans}}^{i-1}(m-1 \rightarrow m)) \cdot \alpha_m \cdot F_{m-1,m} \end{array} \right. \quad (\text{II.21})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{abs}}^i(m,2) = \phi_{\text{abs}}^{i-1}(m,2) + (\phi_{\text{ref}}^{i-1}(m+1 \rightarrow m) \\ \quad + \phi_{\text{trans}}^{i-1}(m+1 \rightarrow m)) \cdot \alpha_m \cdot F_{m+1,m} \end{array} \right. \quad (\text{II.22})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{ref}}^i(m \rightarrow m-1) = \phi_{\text{trans}}^{i-1}(m-1 \rightarrow m) \cdot \rho_m \cdot F_{m-1,m} \end{array} \right. \quad (\text{II.23})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{ref}}^i(m \rightarrow m+1) = \phi_{\text{trans}}^{i-1}(m+1 \rightarrow m) \cdot \rho_m \cdot F_{m+1,m} \end{array} \right. \quad (\text{II.24})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{trans}}^i(m \rightarrow m-1) = (\phi_{\text{trans}}^{i-1}(m+1 \rightarrow m) \\ \quad + \phi_{\text{ref}}^{i-1}(m+1 \rightarrow m)) \cdot \tau_m \cdot F_{m,m-1} \end{array} \right. \quad (\text{II.25})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{trans}}^i(m \rightarrow m+1) = (\phi_{\text{trans}}^{i-1}(m-1 \rightarrow m) \\ \quad + \phi_{\text{ref}}^{i-1}(m-1 \rightarrow m)) \cdot \tau_m \cdot F_{m,m+1} \end{array} \right. \quad (\text{II.26})$$

Il est alors possible de déterminer le flux absorbé par la couche située après le système PV et le flux absorbé par chaque couche :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{abs}}(M+1,1) = \alpha_{M+1} \cdot F_{M,M+1} \cdot \sum_{i=1}^{i=I} \phi_{\text{trans}}^i(M \rightarrow M+1) \end{array} \right. \quad (\text{II.27})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{abs}}(m,1) = \sum_{i=1}^{i=I} \phi_{\text{abs}}^i(m,1) \end{array} \right. \quad (\text{II.28})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{abs}}(m,2) = \sum_{i=1}^{i=I} \phi_{\text{abs}}^i(m,2) \end{array} \right. \quad (\text{II.29})$$

L'énergie restante à répartir est la somme des flux radiatifs transmis et réfléchis par chaque couche qui n'ont pas encore été répartis. Cette somme définit le critère d'arrêt de notre répartition. Elle doit être inférieure à l'erreur choisie, qui dans les problèmes radiatifs est généralement de l'ordre de 10^{-10}W.m^{-2} . La répartition est donc arrêtée quand la condition suivante est remplie :

$$\sum_{m=1}^{m=M} [\phi_{\text{trans}}^i(m \rightarrow m+1) + \phi_{\text{trans}}^i(m+1 \rightarrow m) + \phi_{\text{ref}}^i(m \rightarrow m+1) + \phi_{\text{ref}}^i(m+1 \rightarrow m)] \leq \text{erreur} \quad (\text{II.30})$$

Cette méthode permet donc d'approcher les valeurs des trois types de flux en jeu sur chaque face de chaque couche du système PV issus du phénomène d'inter-réflexions. Ces flux couplés aux autres modèles permettront de connaître la quantité de rayonnement solaire absorbé par le système PV et donc l'impact de ce rayonnement sur sa température.

II.D MODÉLISATION DES TRANSFERTS CONDUCTIFS AU SEIN DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

La modélisation des transferts thermiques conductifs au sein du panneau PV est basée, comme celle du bâtiment, sur l'équation de la chaleur (I.1). La particularité du système PV est la prise en compte des flux convectifs et radiatifs en tant que sollicitations extérieures dans les couches concernées (?). Tout comme dans le modèle d'origine (ISOLAB [Miranville, 2002]), le modèle thermique est résolu selon la méthode des différences finies implicite.

Tout comme les autres parois du bâtiment, le panneau PV sera considéré comme une superposition de plusieurs couches de matériaux de propriétés différentes. Cela engendre une discrétisation nodale tel que le montre la Figure II.7. En ce qui concerne la paroi PV, les types de nœuds peuvent se différencier en 4 catégories :

1. Nœuds internes à une couche solide (opaque ou semi-transparente);

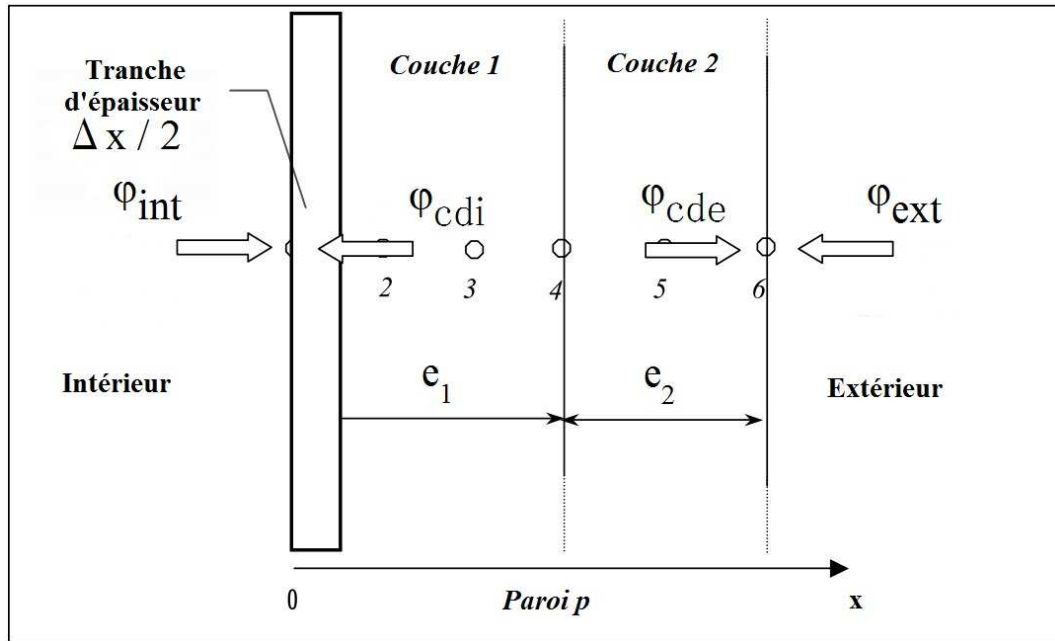


FIGURE II.7 : Exemple de discrétisation d'un mur bi-couche.

2. Nœuds de surface externe et interne du panneau ;
3. Nœuds d'interface entre deux couches solides (opaque(s) ou semi-transparente(s)) ;
4. Nœuds d'interface entre une couche fluide et une couche solide (opaque(s) ou semi-transparente(s)).

Pour le cas des nœuds internes, la méthode consiste à discrétiser de manière spatiale puis temporelle l'équation de la chaleur en se basant sur la formule de Taylor qui, pour une fonction f continue et dérivable, s'écrit.

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \cdot f'(x) + \frac{\Delta x^2}{2!} \cdot f''(x) + O(x^2) \quad (\text{II.31})$$

Pour les autres cas, la méthode consiste à réaliser un bilan des flux « entrants » dans le nœud. En effet, on pourra considérer un type de nœud dit d'interface décrivant les phénomènes physiques entrant en jeu dans ces nœuds, et selon les cas, associer à ces interfaces les flux radiatifs ou convectifs qui leur sont liés.

II.D.1 Cas des nœuds internes d'un milieu solide opaque

L'application de la formule de Taylor (II.31) à un nœud interne quelconque i de température $T((i - 1)\Delta x, t) = T_i$ nous donne :

$$\begin{cases} T_{i+1} = T_i + \Delta x \cdot \frac{\partial T_i}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} & \text{(II.32a)} \\ T_{i-1} = T_i - \Delta x \cdot \frac{\partial T_i}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} & \text{(II.32b)} \end{cases}$$

En additionnant les équations (II.32a) et (II.32b), on obtient :

$$T_{i+1} + T_{i-1} = 2 \cdot T_i + \Delta x^2 \cdot \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} \quad \text{avec} \quad \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1} - 2 \cdot T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} \quad \text{(II.33)}$$

En appliquant l'équation (II.33) à un l'un quelconque des nœuds internes de la couche k , on a alors :

$$\frac{1}{a_c} \cdot \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{T_{i+1} - 2 \cdot T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} \quad \text{(II.34)}$$

Avec $a_c = \frac{\lambda_c}{\rho_k \cdot C_{P_c}}$ la diffusivité thermique en $m^2 \cdot s^{-1}$.

La discrétisation temporelle l'équation (II.34) est réalisée en utilisant un schéma aux différences finies d'ordre 1 :

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} \quad \text{(II.35)}$$

On a alors :

$$T_i^{t+\Delta t} - T_i^t = \frac{a_c \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \cdot [T_{i+1}^{t+\Delta t} - 2 \cdot T_i^{t+\Delta t} + T_{i-1}^{t+\Delta t}] \quad \text{(II.36)}$$

En posant $k_c = \frac{\lambda_c}{\Delta x_c}$, $C_c = \rho_c \cdot C_{P_c} \cdot \Delta x_c$ et $\tau_c = \frac{C_c}{k_c}$, il vient finalement :

$$\boxed{T_i^t = -\frac{\Delta t}{\tau_c} \cdot T_{i+1}^{t+\Delta t} + \left(1 + 2 \cdot \frac{\Delta t}{\tau_c}\right) \cdot T_i^{t+\Delta t} - \frac{\Delta t}{\tau_c} \cdot T_{i-1}^{t+\Delta t}} \quad \text{(II.37)}$$

Sous cette forme, l'équation (II.37) offre l'avantage de se présenter comme le système d'équation matriciel précédemment cité (I.9) p.27. Pour rappel, cette équation matricielle se présentait comme suit :

$$[A]_i [T_i]^t = [A]_e \cdot [T_i]^{t+\Delta t} + [B]^{t+\Delta t} \quad \text{(II.38)}$$

II.D.2 Cas des nœuds d'interface

Les nœuds d'interface concernent les configurations solide/solide ou solide/fluide, quelque soit la position du nœud dans la paroi. Pour ce type de nœud, la méthode consiste à réaliser un bilan des flux « entrants » dans le nœud (voir Figure II.8).

Sur la Figure II.8, les flux $\varphi_{c,d,i,av}$ et $\varphi_{c,d,i,ap}$ sont les densités de flux conductifs provenant respectivement du côté extérieur et du côté intérieur de la paroi ; et les flux $\varphi_{i,av}$ et $\varphi_{i,ap}$ sont les autres types de flux provenant respectivement du côté extérieur et du côté intérieur de la paroi (c'est-à-dire la somme des flux radiatifs de courte longueur d'onde(CLO) et de grande longueur d'onde (GLO), et des flux convectifs). Les flux CLO traduisent les flux issus du rayonnement solaire ou de systèmes d'éclairages, alors que les flux GLO traduisent les échanges du système avec ses environnements interne et externe. Par exemple, dans le cas d'un bâtiment, ceci se traduit par les échanges entre parois et les échanges avec l'environnement extérieur (bâtiments, éléments du paysage, etc.).

Ces flux seront la somme des flux radiatifs et convectifs provenant des deux directions. Par convention, les nœuds seront numérotés de 1 (à l'intérieur) à N (à l'extérieur) (avec N le nombre total de nœuds dans une paroi PV), et les couches de 1 à K (avec K le nombre total de couches dans une paroi PV). On peut alors écrire le bilan énergétique du nœud pour les tranches d'épaisseur $\frac{\Delta x_c}{2}$ et $\frac{\Delta x_{c+1}}{2}$ de part et d'autre de l'interface :

$$\begin{aligned} \delta_{n-,s} [\varphi_{c,d,i,av}]^{(n-)} + \delta_{n+,s} [\varphi_{c,d,i,ap}]^{(n+)} + \varphi_{i,av} + \varphi_{i,ap} = \delta_{n-,s} \left[\rho_c \cdot C_{Pc} \cdot \left(\frac{\Delta x_c}{2} \right) \cdot \left(\frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} \right) \right]^{(n-)} \\ + \delta_{n+,s} \left[\rho_{c+1} \cdot C_{P_{c+1}} \cdot \left(\frac{\Delta x_{c+1}}{2} \right) \cdot \left(\frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} \right) \right]^{(n+)} = 0 \quad (\text{II.39}) \end{aligned}$$

Dans l'équation (II.39), les exposants "n+" et "n-" indiquent la nature des matériaux avant et après l'interface (fluide f ou solide s). En fonction de la nature des matériaux de part d'autres de l'interfaces, certains termes de l'équation vont donc s'annuler selon les conditions suivantes.

Si la couche avant l'interface est fluide et la suivante solide, on a :

$$\left. \begin{array}{l} n+ = f \\ n- = s \end{array} \right\} \implies \left\{ \begin{array}{l} \delta_{n+,s} = 0 \\ \delta_{n-,s} = 1 \end{array} \right. \quad (\text{II.40})$$

Si la couche avant l'interface est solide et la suivante fluide, on a :

$$\left. \begin{array}{l} n+ = s \\ n- = f \end{array} \right\} \implies \left\{ \begin{array}{l} \delta_{n+,s} = 1 \\ \delta_{n-,s} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.41})$$

Si les deux couches sont solides, on a :

$$\left. \begin{array}{l} n+ = s \\ n- = s \end{array} \right\} \implies \left\{ \begin{array}{l} \delta_{n+,s} = 1 \\ \delta_{n-,s} = 1 \end{array} \right. \quad (\text{II.42})$$

Si les deux couches sont fluides, on a :

$$\left. \begin{matrix} n+ = f \\ n- = f \end{matrix} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \delta_{n+,s} = 0 \\ \delta_{n-,s} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

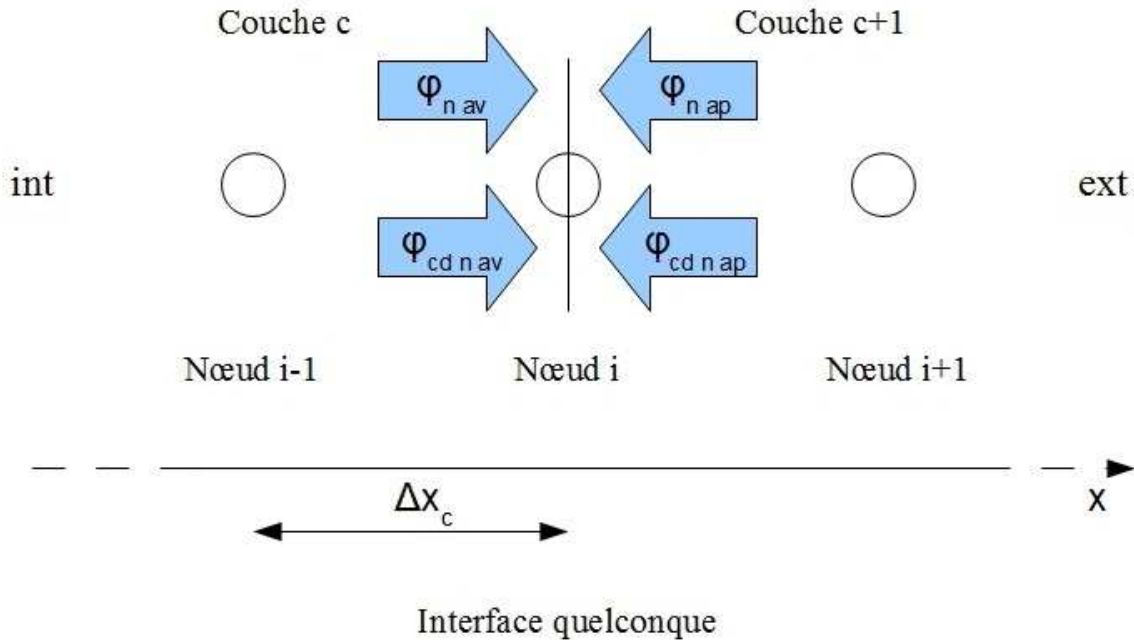


FIGURE II.8 : Bilan des flux « entrants » dans un nœud de type interface.

L'équation (II.39) est valable en l'état pour toutes les interfaces solides/solides opaques ou semi-transparentes. Il est bien évident qu'une paroi opaque ne laissera passer aucun flux radiatif et que le terme correspondant sera nul (voir Partie II.C p.66).

En supposant les flux conductifs définis comme suit :

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_{cd,i,av} &= \frac{\lambda_c}{\Delta x_c} (T_{i-1}^{t+\Delta t} - T_i^{t+\Delta t}) & (\text{II.44a}) \\ \varphi_{cd,i,ap} &= \frac{\lambda_{c+1}}{\Delta x_{c+1}} (T_{i+1}^{t+\Delta t} - T_i^{t+\Delta t}) & (\text{II.44b}) \end{aligned} \right.$$

Il vient finalement :

$$\begin{aligned} T_i^t = & \left[1 - \frac{\Delta t \cdot (k_c + k_{c+1})}{C_l} \right] T_i^{t+\Delta t} \\ & + \frac{\Delta t \cdot (k_c + k_{c+1})}{C_l} \cdot T_{i-1}^{t+\Delta t} + \frac{\Delta t \cdot (k_c + k_{c+1})}{C_l} \cdot T_{i+1}^{t+\Delta t} \\ & + \frac{\Delta t}{C_l} \cdot (-\varphi_{i\ av} - \varphi_{i\ ap}) \quad (\text{II.45}) \end{aligned}$$

$$\text{Avec } C_l = \frac{C_c + C_{c+1}}{2}$$

Cette description du système PV a pour avantage d'être complètement générique du point de vue thermique. Cependant, il ne faut pas oublier quatre points essentiels pour un bon fonctionnement du modèle et un couplage réussi avec *ISOLAB* :

1. Prendre en compte les échanges convectifs dans les lames d'air en intégrant un bilan thermo-convectif pour chaque lame d'air ;
2. Prendre en compte les échanges convectifs avec l'intérieur du bâtiment en créant le lien entre le modèle conductif de paroi PV et le bilan thermo-convectif de la zone sur laquelle elle est installée ;
3. Lier le modèle conductif de la paroi au bilan radiatif de la zone ;
4. Transférer le flux radiatif transmis de la paroi à la zone dans le cas des verrières.

Il faut également noter que l'équation (II.45) peut également décrire le problème conductif des nœuds internes des milieux solides semi-transparents, en considérant le nœud en question comme une interface entre un même milieu.

II.E MODÉLISATION ÉLECTRIQUE DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Le modèle électrique utilisé est le modèle à simple diode (aussi appelé "single-diode model") [Chenni *et al.*, 2007a]. Ce modèle utilise des informations fournies par les fiches techniques des panneaux photovoltaïques pour les modéliser :

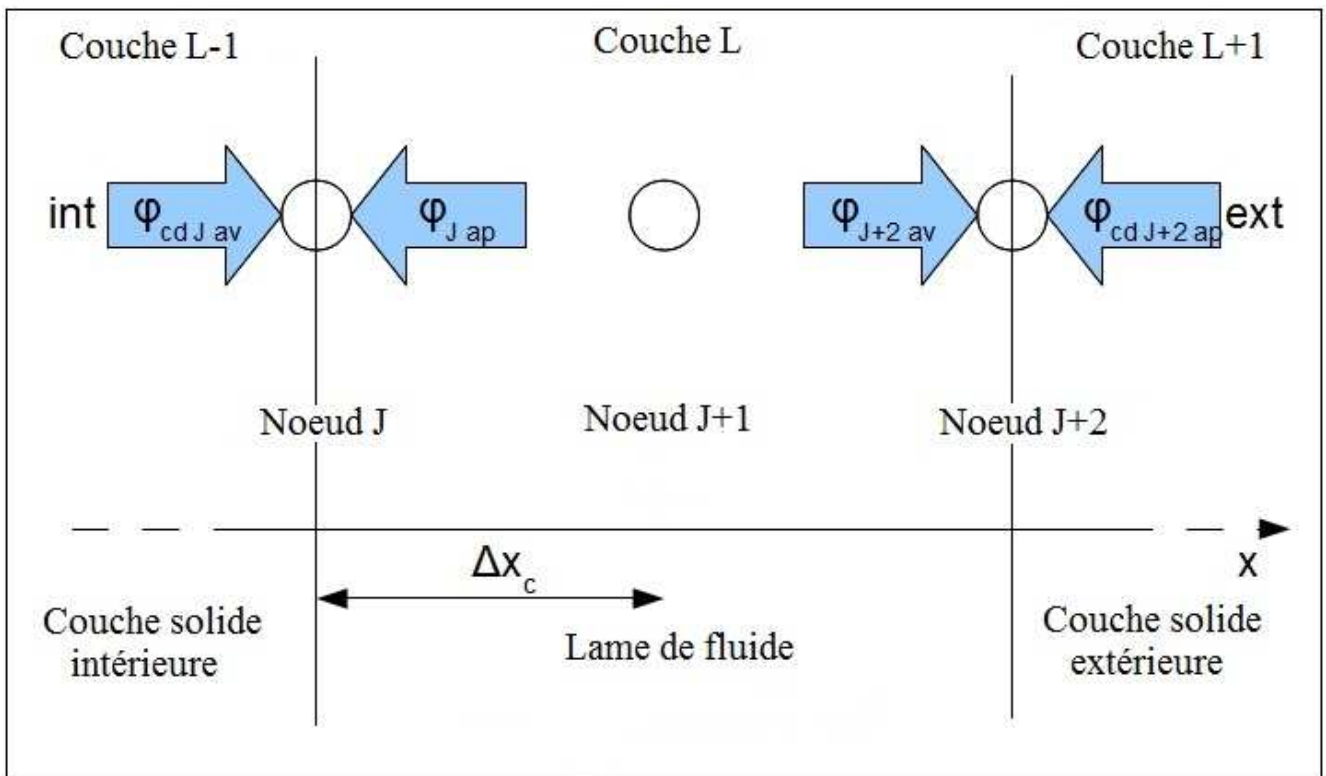


FIGURE II.9 : Bilan des flux « entrants » dans les nœuds de type interface en contact avec une lame d'air.

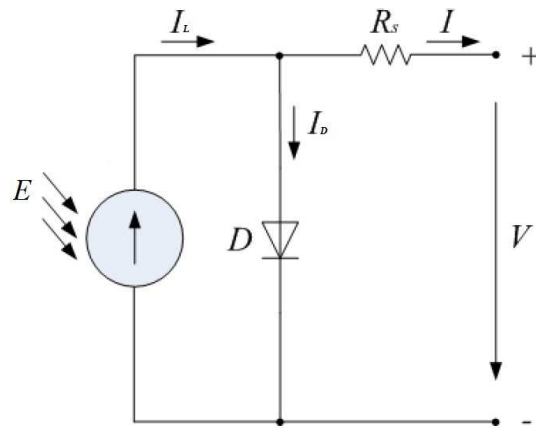


FIGURE II.10 : Circuit équivalent du modèle à quatre paramètres, aussi appelé "single-diode model" [Chenni *et al.*, 2007a].

1. Le courant de court-circuit $I_{sc,ref}$;
2. La tension à vide $V_{oc,ref}$;
3. Le coefficient de température de courant de court-circuit μ_{isc} ;
4. Le coefficient de température de tension à vide μ_{voc} ;
5. Le point de puissance maximale de référence ($I_{mp,ref}, V_{mp,ref}$) ;

En premier lieu, le modèle sera utilisé pour valider numériquement le paramétrage du modèle radiatif, et vérifier que la quantité d'énergie absorbée par la couche photovoltaïque correspond bien à l'énergie électrique obtenue avec le modèle à simple diode. Si c'est bien le cas, ce modèle radiatif permettra d'obtenir le point de puissance maximale disponible en sortie de panneau PV. Ce point (MPPT) correspond à l'énergie transformée en électricité par le panneau photovoltaïque quand la charge appelée par le récepteur (batterie, circuit électrique, régulateur de charge, etc.) est supérieure ou égale à la puissance maximale disponible.

Cette manière de procéder offre l'avantage de laisser de côté les erreurs issues de la modélisation de la température du panneau, les deux modèles se basant sur la même température pour déterminer la puissance électrique du panneau PV. En effet, la température de panneau fournie au modèle à simple diode sera la température calculée par le modèle thermique de panneau PV. Par la suite, mieux la température sera à son tour modélisée et mieux sera la prédiction du productible PV.

L'intensité aux bornes d'un panneau est obtenue en appliquant les lois de Kirshoff (cf Figure II.10) :

$$I = I_L - I_D \quad (II.46)$$

Où I_L est le courant induit par le rayonnement solaire aux bornes de la cellule photovoltaïque, et I_D le courant aux bornes de la diode.

Le courant induit par le rayonnement solaire est déterminé par rapport à des mesures aux conditions de référence :

$$I_L = \left(\frac{G}{G_{REF}} \right) \cdot (I_{L,REF} + \mu_{isc} \cdot (T_{PV} - T_{PV,REF})) \quad (II.47)$$

Le terme $\frac{G}{G_{REF}}$ tient compte de la perte ou du gain d'ensoleillement entre les conditions normales de tests industriels du capteur PV et les conditions de son environnementales de son exploitation.

Le courant de diode I_D est donné par l'équation de Shockley :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I_0 \cdot R_s)}{\gamma \cdot k \cdot T_{PV}} \right) - 1 \right] \quad (II.48)$$

Le courant de saturation inverse I_0 est :

$$I_0 = I_{0,REF} \left(\frac{T_{PV}}{T_{PV,REF}} \right)^3 \cdot \exp \left[\left(\frac{q \cdot \epsilon_G}{k \cdot A} \right) \left(\frac{1}{T_{PV,REF}} - \frac{1}{T_{PV}} \right) \right] \quad (II.49)$$

Avec :

– $I_{0,REF}$, le courant de saturation de référence :

$$I_{0,REF} = I_{SC,REF} \cdot \exp \left(\frac{-q \cdot V_{OC,REF}}{k \cdot \gamma \cdot T_{PV,REF}} \right) \quad (II.50)$$

– q , la charge de l'électron ;

– R_s , la résistance de série du circuit en Ω ;

– k , la constante de Stefan Boltzmann ;

– ϵ_G , l'énergie du "band gap" du matériau ;

– A , le facteur d'achèvement qui peut être déterminé par l'intermédiaire du facteur de forme γ :

$$\begin{cases} \gamma = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} & (II.51a) \\ \gamma = A \cdot NCS \cdot NS & (II.51b) \end{cases}$$

Où NCS est le nombre de cellules photovoltaïque connectées en série par panneau, et NS le nombre de panneaux connectés en série du système.

La résistance de série du système photovoltaïque est calculée grâce à une méthode itérative. La méthode, présentée sur le synoptique de la Figure II.11, consiste à calculer le coefficient de rendement de la tension du système, et à la comparer à la valeur fournie par le constructeur, et en fonction du résultat, recalculer R_s jusqu'à convergence de cette dernière variable. La valeur initiale de $R_{s,min}$ est fixée à 0Ω . Le critère de convergence présenté sur la Figure II.11 est atteint lorsque la valeur de R_s se stabilise par rapport au calcul précédent.

$$R_{s,max} = \frac{1}{I_{MP,REF}} \left[\frac{k \cdot T_{PV,REF} \cdot NCS}{q} \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{MP,REF}}{I_{SC,REF}} \right) + V_{OC,REF} - V_{MP,REF} \right] \quad (II.52)$$

Les valeurs des paramètres nécessaires à ces équations sont disponibles dans le Tableau II.2.

Remarque : De futures études devront être menées pour pouvoir modéliser d'un point de vue électrique le bâtiment et donc les équipements qu'il contient.

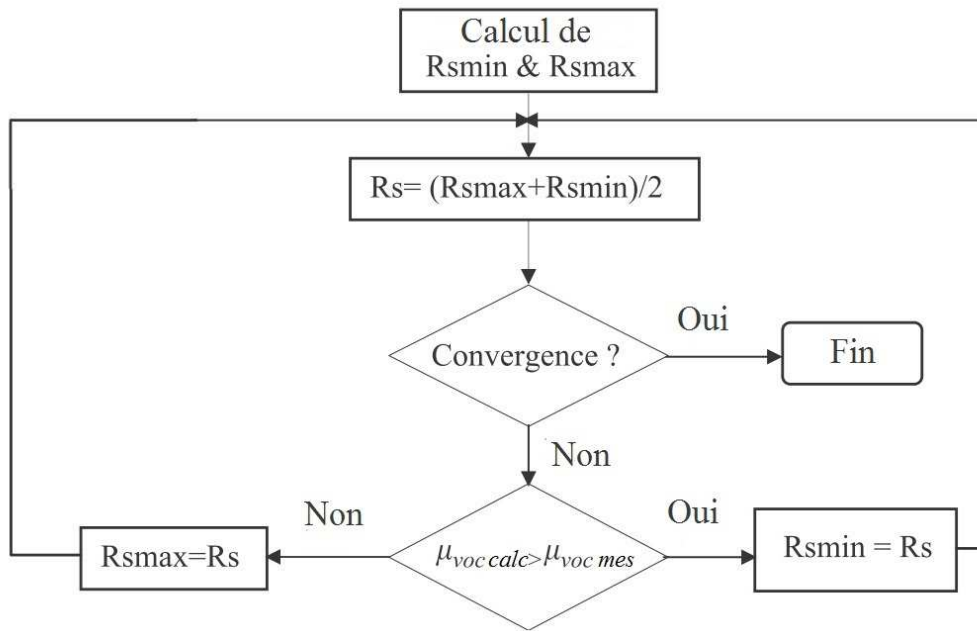


FIGURE II.11 : Synoptique du calcul de la résistance de série R_s [Chenni *et al.*, 2007a].

Nom du paramètre	Valeur numérique
ϵ_G	1,12 eV pour du silicium
q	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$
k	$1,381 \cdot 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$

Tableau II.2 : Paramètres utilisés pour la modélisation électrique

II.F COUPLAGE DES MODÈLES

Pris séparément, les modèles présentés précédemment (convectif, radiatif, conductif et électrique) permettent pour chacun de décrire un phénomène physique particulier. Dans notre cas, nous voulons décrire l'évolution thermique d'une paroi photovoltaïque complexe, en prenant en compte les différentes interactions possibles au sein du système. Pour y arriver, nous allons coupler les modèles conductif, convectif et radiatif au sein de l'équation de la chaleur (I.1). Le modèle électrique va permettre quant à lui de valider la modélisation radiative du panneau photovoltaïque et permettre une meilleure modélisation électrique du bâtiment et des systèmes utilisés avec le système photovoltaïque (batteries, onduleur, appareils électriques, etc.).

En effet, dans le modèle créer, le productible PV est calculé au sein du modèle radiatif. Il est égal à la somme des flux absorbés par les couches de matériaux semi-conducteurs. Au contraire du modèle radiatif, le modèle électrique est un modèle validé sur la base d'informations fournies par les constructeurs et capable de donner la production électrique d'un panneau photovoltaïque à un instant donné en fonction de l'ensoleillement et de la température du panneau PV. Habituellement, pour que ce modèle fonctionne correctement, la température du panneau PV est calculée grâce à des modèles empiriques ou est directement mesurée sur l'installation PV étudiée. Cependant, pour les besoins de validation du modèle radiatif, la température utilisée sera celle calculée par le modèle. Ainsi, la valeur calculée par le modèle électrique sera utilisée comme valeur de référence pour valider le modèle radiatif du point

de vue de la prédiction de la puissance électrique produite par l'installation photovoltaïque. Car la validation du seul point de vue thermique de ce type de paroi complexe n'est pas forcément suffisante, les fortes interactions entre les paramètres radiatifs compliquant parfois les séquences d'optimisation (ceci sera abordé plus en détail dans la suite de ce mémoire). Ce type de validation numérique s'avère nécessaire lorsque le productible PV ne peut être mesuré.

Lors de la présentation du modèle conductif, il a été fait mention dans l'équation (II.45) de flux entrants sur les faces avant et arrière d'une couche de matériau i : $\varphi_{i\text{ av}}$ et $\varphi_{i\text{ ap}}$. Le couplage des modèles va simplement consister à remplacer ces flux par les flux radiatifs ou convectifs (??) adéquats.

On comprend alors le choix qui a été fait de découpler les flux radiatifs absorbés par une couche en deux parties différenciées de manière directionnelle. Ainsi, les valeurs à insérer dans l'équation (II.45) sont directement disponibles en sortie du modèle radiatif.

En ce qui concerne les flux convectifs, le modèle ne fournit que le coefficient d'échange convectif à l'interface solide/fluide. Il faut donc s'appuyer sur l'équation (II.1), et l'intégrer aux équations (??) pour correctement prendre en compte le flux convectif :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_N^t = \left(1 + \frac{2 \cdot \Delta t}{\tau_c}\right) \cdot T_N^{t+\Delta t} - \frac{2 \cdot \Delta t}{\tau_c} \cdot T_{N-1}^{t+\Delta t} - \frac{2 \cdot \Delta t}{C_c} \cdot h_{cv_{ext}} \cdot (T_N^{t+\Delta t} - T_{ext}^{t+\Delta t}) \end{array} \right. \quad (II.53a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1^t = \left(1 + \frac{2 \cdot \Delta t}{\tau_c}\right) \cdot T_1^{t+\Delta t} - \frac{2 \cdot \Delta t}{\tau_c} \cdot T_2^{t+\Delta t} - \frac{2 \cdot \Delta t}{C_c} \cdot h_{cv_{int}} \cdot (T_1^{t+\Delta t} - T_{int}^{t+\Delta t}) \end{array} \right. \quad (II.53b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{J+2}^t = \left(1 + \frac{2 \cdot \Delta t}{\tau_{L+1}}\right) \cdot T_{J+2}^{t+\Delta t} - \frac{2 \cdot \Delta t}{\tau_{L+1}} \cdot T_{J+1}^{t+\Delta t} - \frac{2 \cdot \Delta t}{C_{L+1}} \cdot h_{cv_{J+1}} \cdot (T_{J+2}^{t+\Delta t} - T_{J+1}^{t+\Delta t}) \end{array} \right. \quad (II.53c)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_J^t = \left(1 + \frac{2 \cdot \Delta t}{\tau_{L-1}}\right) \cdot T_J^{t+\Delta t} - \frac{2 \cdot \Delta t}{\tau_{L-1}} \cdot T_{J+1}^{t+\Delta t} - \frac{2 \cdot \Delta t}{C_{L-1}} \cdot h_{cv_{J+1}} \cdot (T_J^{t+\Delta t} - T_{J+1}^{t+\Delta t}) \end{array} \right. \quad (II.53d)$$

Le modèle électrique, quant à lui, ne va pas uniquement servir à calculer la puissance électrique délivrée par le système PV, mais aussi permettre le lancement de séquences d'optimisation permettant de retrouver les paramètres optiques (du modèle radiatif) décrivant le mieux le comportement du panneau photovoltaïque étudié. En effet, le modèle radiatif implémenté dans le code de calcul est en théorie capable de fournir la puissance absorbée (et transformée en électricité) par la couche de matériau semi-conducteur. Cependant, les paramètres de ce modèle doivent être réglés, car la plupart ont été estimés d'après ce qui est communément admis par la communauté scientifique. Cette application du modèle électrique sera développée plus loin dans ce rapport de thèse dans le Chapitre IV traitant de l'optimisation du modèle de panneau photovoltaïque intégré au bâtiment.

En utilisant les équations (II.37), (II.45) et (II.53), un système d'équations est obtenu où chaque ligne correspond à l'évolution thermique de chacun des nœuds de la paroi photovoltaïque complexe. Ce système peut alors être représenté sous une forme matricielle, de la même manière que la modélisation du bâtiment (I.10) p.27 :

$$[T]_{PV}^{t+\Delta t} = ([A_{PV}]_i \cdot [T_{PV}]^t - [B_{PV}]) \cdot [A_{PV}]_e^{-1} \quad (II.54)$$

Ce système d'équation peut alors être intégré à ISOLAB, comme indiqué dans la partie suivante.

II.G INTÉGRATION DU MODÈLE DE PANNEAU PV À ISOLAB

L'intégration du modèle de panneau PV à ISOLAB a été effectuée en créant une matrice représentant les échanges thermiques au sein du bâtiment et celle du panneau PV l'une en dessous de l'autre (cf. : équations (II.57), (II.58), (II.59) et (II.60)). La matrice créée représente alors l'évolution de température d'un bâtiment à N éléments (parois, volumes d'air, etc.) et M parois photovoltaïques.

Reprenons le système matricielle (II.55) p.79 :

$$[\dot{T}] = [A] \cdot [T] + [B] \cdot [U] \quad (II.55)$$

Pour un bâtiment quelconque, les matrices [A] et [B] se présenteront comme suit :

$$\begin{bmatrix} [A]_1 & & \\ & \ddots & \\ & & [A]_N \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} [B]_1 \\ \vdots \\ [B]_6 \end{bmatrix} \quad (II.56)$$

Discretisé, ce système devient :

$$[M_e] \cdot [T]^{t+1} = [M_i] \cdot [T]^t + [S] \quad (II.57)$$

Les matrices [M_e] et [M_i] étant définies comme suit dans le cas d'un bâtiment seul :

$$\begin{bmatrix} [M_e]_1 & & \\ & \ddots & \\ & & [M_e]_N \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} [M_i]_1 & & \\ & \ddots & \\ & & [M_i]_N \end{bmatrix} \quad (II.58)$$

En intégrant les termes décrivant le ou les panneaux PV, on obtient :

$$\begin{bmatrix} [M_e]_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & [M_e]_N & & \\ & & & [M_e]_{PV_1} & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & [M_e]_{PV_M} \end{bmatrix} \quad \text{idem pour } [M_i] \quad (II.59)$$

Et :

$$\begin{bmatrix} [T]_1 \\ \vdots \\ [T]_N \\ [T]_{PV_1} \\ \vdots \\ [T]_{PV_M} \end{bmatrix} \quad \text{idem pour } [S] \quad (II.60)$$

Lorsque la matrice (II.57) a été créée, l'intégration n'est pas complète. Il faut encore créer les interactions qui existent entre les parois photovoltaïques, les autres parois d'une zone, les volumes intérieurs du bâtiment. Ces interactions sont gérés par l'intermédiaire des termes de couplages (cf équation (II.53b)). Dans les deux cas, le couplage se fait comme il est réalisé habituellement dans *ISOLAB* ; en effet, la paroi photovoltaïque n'est qu'une autre forme de paroi de bâtiment. Cela implique les deux types d'interactions suivantes :

1. Les échanges radiatifs avec les autres parois de la zone sur laquelle le panneau PV est installé ;
2. Les échanges convectifs entre la paroi PV et l'air de la zone sur laquelle le panneau PV est installé.

Les échanges radiatifs avec les autres parois de la zone sont pris en compte en modifiant le bilan radiatif issu du calcul de la température radiante moyenne T_{rm} [Miranville, 2002]. L'intégration est faite en ajoutant la paroi PV au bilan, et en déduisant la surface du panneau PV à la surface de sa paroi d'appartenance (II.61). On peut noter que le dénominateur de la fraction ne contient pas les surfaces des parois complexes photovoltaïques. Ceci est dû au fait que même si ces parois sont considérées comme des parois supplémentaires du système au niveau des équations représentatives du système, cela ne change rien à la quantité de surface d'un volume d'air. En effet, on aurait pu ajouter les surfaces des parois complexes photovoltaïques au dénominateur, mais il aurait fallut alors les retrancher aux surfaces des parois où elles sont intégrées. Au final, la valeur de la quantité de surface aurait donc été la même, à savoir $\sum_{p=1}^{N_p} S_p$.

$$T_{rm} = \frac{\sum_{p=1}^{N_p} (S_p - S_{PV,p}) \cdot T_{si,p} + \sum_{q=1}^{N_{PV}} S_{PV,q} \cdot T_{si,PV}}{\sum_{p=1}^{N_p} S_p} \quad (\text{II.61})$$

Les échanges convectifs avec l'air de la zone sont pris en compte en modifiant le bilan thermoconvectif du noeud d'air [Miranville, 2002]. L'intégration est faite en ajoutant le coefficient d'échange convectif intérieur au bilan de la zone z (II.62), et en déduisant, comme pour T_{rm} , la surface du panneau PV à la surface de sa paroi d'appartenance.

$$\sum_{p=1}^{N_p} \cdot h_{ci,p} \cdot (S_p - S_{PV,p}) \cdot (T_{si,p} - T_{az}) + \sum_{q=1}^{N_{PV}} \cdot h_{ci,q} \cdot S_{PV,q} \cdot (T_{si,PV,q} - T_{az}) = \rho_z \cdot C_z \cdot V_z \cdot \frac{dT_{az}}{dt} \quad (\text{II.62})$$

Ces intégrations faites, une fenêtre de description des panneaux PV (cf Figure II.12) a été rajoutée à *ISOLAB* et des simulations ont été lancées afin de valider le modèle de panneau photovoltaïque présenté dans ce chapitre. La Figure II.13 présente un synoptique de l'intégration du modèle de panneau photovoltaïque dans *ISOLAB*.

Il est également possible de préciser que le modèle de panneau photovoltaïque est capable de modéliser une paroi traditionnelle. Ceci a fait l'objet d'une publication [Miranville *et al.*, 2008] et a permis de vérifier l'implémentation du modèle de paroi complexe photovoltaïque avant de procéder à la validation expérimentale. Car même si le modèle a été construit dans le but de modéliser des parois en partie semi-transparentes, le fait de s'être appuyer sur un modèle de paroi opaque pour sa conception lui donne la capacité de modéliser ce type de parois.

FIGURE II.12 : Fenêtre de description des panneaux PV implémentée dans *ISOLAB*.

II.H CONCLUSION DU CHAPITRE II

Ce chapitre de modélisation a permis de définir un modèle de panneau photovoltaïque, mais aussi une méthode de validation de ce modèle.

Tout d’abord, une méthodologie de modélisation a été présentée. Les différentes étapes de cette méthode couramment utilisée pour valider les codes de simulation thermique de bâtiment ont été détaillées et une application aux bâtiments équipés de panneaux PV (BIPV) a été proposée. Cette application a consisté, dans un premier temps, à évaluer les besoins au niveau de la modélisation d’un bâtiment équipé de panneaux PV intégrés ou semi-intégrés. Ceci a permis de choisir la meilleure solution en termes de modélisation et il a alors été décidé de créer un modèle de panneau PV et de le coupler à un prototype de code de simulation du bâtiment, créé dans le laboratoire PIMENT, *ISOLAB* [Miranville, 2002].

En se référant aux codes de simulation existants, il a été décidé de créer un modèle de panneaux PV et de l’ajouter au code de simulation *ISOLAB*. Ce code a alors été présenté ainsi que son environnement d’implémentation. Cette description d’*ISOLAB* a permis d’établir qu’il était nécessaire de lui ajouter deux nouveaux modules pour qu’il soit capable de modéliser notre système de paroi complexe photovoltaïque : un module permettant la description de ce type de paroi et un autre permettant d’établir les systèmes d’équations modélisant leur comportement sur la base du fichier de description du premier module.

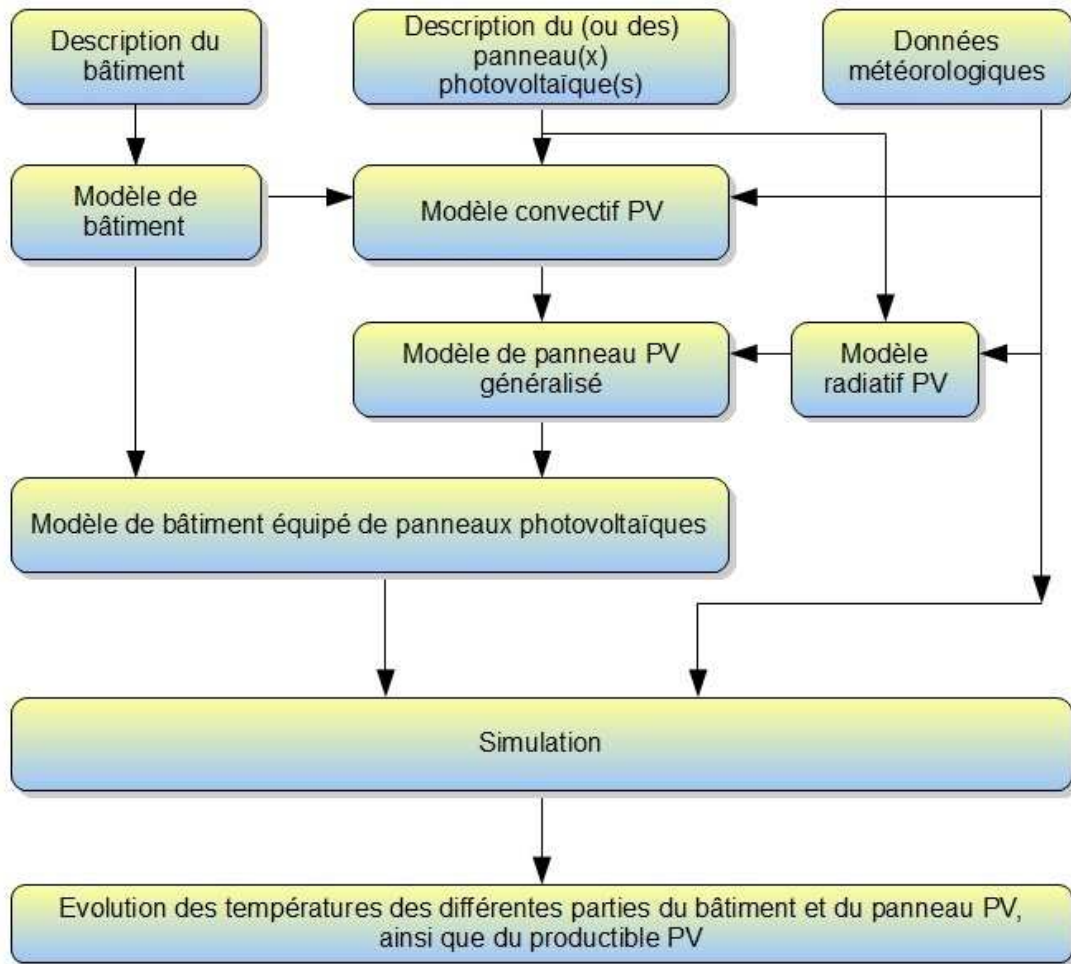


FIGURE II.13 : Synoptique de l'intégration du modèle de panneau photovoltaïque dans ISOLAB.

Afin de concevoir ces modules, les hypothèses de modélisation intégrée de panneau PV ont été présentées, à savoir la nécessité de mettre en place des modèles de transferts convectifs et radiatifs spécifiques à ce type de paroi, respectivement pour la convection dans les lames d'air en cavités rectangulaires et les transferts radiatifs dans les milieux multi-couches semi-transparents.

Dans un second temps, les expérimentations envisageables sur la plate-forme expérimentale du laboratoire ont été brièvement décrites.

Dans un troisième temps, les méthodes existantes de validation de modèle ont été présentées et une application de la méthode de validation expérimentale a été proposée. Il a été établi que des prospections bibliographiques fourniraient un inventaire des expérimentations possibles et des modèles de panneau PV existants. Ceci permet de prendre conscience des avantages et inconvénients des expérimentations et des modèles inventoriés et un choix combiné des modèles et des expérimentations nécessaires à leur validation est proposé.

Le modèle peut alors être créé et sa validation expérimentale lancée. Cette validation comprend

trois parties : une première de confrontation des résultats de simulation aux mesures, une seconde d'identification des sources de l'erreur de modélisation et une troisième d'optimisation du modèle.

Ensuite, la description méthodologique terminée, la modélisation du panneau photovoltaïque lui-même a été faite. Cette modélisation a débuté par l'inventaire des modèles de transferts convectifs choisis, puis a poursuivi par la présentation du modèle des transferts radiatifs en milieu semi-transparent, par celle du modèle des transferts conductifs et pour terminer par le modèle électrique.

Les modèles de transferts convectifs comprennent les modèles de description de la convection naturelle dans une lame d'air confinée et de la convection forcée dans une lame d'air ouverte. Le premier est basé sur les travaux de [Bejan, 1984], et le second sur ceux de [Daguenet, 1985]. Ces modèles sont tous les deux des modèles empiriques issus de codes CFD.

Le modèle de transfert radiatif s'appuie quant à lui sur un bilan de flux par la méthode de tracé de rayon (« ray tracing »). Il permet d'obtenir les flux absorbés par les différentes couches semi-transparentes du système, ainsi que son productible PV. Le modèle de transfert radiatif étant capable de fournir le productible PV, le modèle électrique ne sera utilisé que comme base de vérification du bon paramétrage du modèle radiatif.

Le modèle conductif est le même que celui implémenté dans *ISOLAB* mais a été retravaillé dans le but d'intégrer les flux convectifs spécifiques aux lame d'air et ceux radiatifs spécifiques aux milieux semi-transparentes. Ceci a constitué le couplage des différents modèles.

La modélisation des transferts conductifs étant analogue à celle utilisée au sein d'*ISOLAB*, un système d'équations de forme matricielle est obtenu. Ce système a aisément été intégré et couplé à la matrice de description du bâtiment habituellement construite par *ISOLAB*.

Finalement, un modèle thermique de bâtiment BIPV a été mis en équations, capable non seulement de prévoir le productible PV et l'évolution du champ de température des deux systèmes, mais surtout capable de modéliser les interactions des deux systèmes et donc l'impact de l'un sur l'autre.

Le passage de ces équations manuscrites à l'implémentation ne se fait pas immédiatement ; il est en effet nécessaire d'avoir une réflexion préalable sur l'approche qu'il faut adopter lors de l'implémentation, car elle va conditionner l'évolutivité du code. Le caractère générique, en particulier, nécessite une attention de tous les instants.

La mise en place des systèmes matriciels pour une configuration donnée, figée, est certes délicate, mais réalisable rapidement. La génération automatique et non définie à l'avance de systèmes matriciels, quant à elle, est plus exigeante et plus longue. En effet, l'intégration du modèle de panneau PV à *ISOLAB* a demandé un certain temps afin tout d'abord de comprendre les différentes parties du code, les couplages de ces parties les unes avec les autres et le fonctionnement global du code. De plus, il a fallu réfléchir à l'intégration du modèle de panneau PV au code *ISOLAB* et à l'implémentation nécessaire à cette intégration.

Au final, l'implémentation du modèle de panneau PV a abouti à la création de deux modules supplémentaires qui ont été ajoutés à ceux existants dans *ISOLAB*. Le premier module permet la création du système d'équations matricielles décrivant le panneau PV au départ du fichier de description du bâtiment BIPV. Le second module, quant à lui, permet l'ajout de la description du panneau PV à celle

du bâtiment. Ce dernier module a été interfacé à travers une fenêtre accessible depuis *ISOLAB*.

Le modèle ayant été implémenté et intégré à *ISOLAB*, il est encore nécessaire, d'après la méthodologie présentée, de le valider. Pour ce faire, une expérimentation doit être menée dans le but d'obtenir une base de données de validation expérimentale. Cette expérimentation fait justement l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III

EXPÉRIMENTATION

L'expérimentation est une étape importante dans toute étude ayant pour but de mieux appréhender les phénomènes physiques. Elle peut permettre de mieux comprendre les phénomènes ayant lieu dans la nature, mais aussi confirmer ou infirmer des hypothèses en observant plusieurs fois le même phénomène dans un milieu contrôlé ou dans un environnement naturel. Dans le domaine de la physique du bâtiment, elle est utilisée pour ces deux raisons.

Dans ce chapitre, les expérimentations menées dans le cadre de cette thèse seront présentées. Chaque équipement expérimental sera décrit, et les séquences qui ont été menées détaillées. Toutes les mesures qui ont été effectuées l'ont été en environnement naturel, sur les cellules ISOTEST. En plus de ces équipements, une station météorologique a été utilisée pour mesurer les conditions environnementales et un contrôleur de charge a été la solution choisie pour remédier au problème de la mesure des données électriques du système.

Par la suite, une présentation de ces équipements est faite, en commençant par décrire la plate-forme expérimentale, et en détaillant les éléments la composant qui ont été utilisés au cours de cette thèse (station météorologique, cellules ISOTEST et types de panneaux photovoltaïques). Ensuite, les séquences expérimentales qui ont pu être menées sont décrites et analysées. Une conclusion au chapitre résume finalement les points clés de l'expérimentation et les résultats importants.

III.A PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE

La plate-forme expérimentale se situe à l'Institut Universitaire de Technologie de l'Université de La Réunion. Sa particularité réside dans l'association de supports expérimentaux à échelle réduite, les cellules ISOTEST et d'un support à échelle unité, la cellule LGI, auxquels viennent s'ajouter une station météorologique. Le placement des divers éléments de la plate-forme a été fait de manière à ce qu'ils permettent de réaliser des campagnes de mesures fiables et objectives [Miranville, 2002]. L'ensoleillement et le vent ont été pris en compte afin de déterminer une disposition qui interdise toute influence d'un support expérimental donné sur un autre.

En ce qui concerne l'ensoleillement, les différents éléments de la plate-forme ont été disposés de



FIGURE III.1 : Vue d'ensemble de la plateforme expérimentale de l'IUT de Saint-Pierre (La Réunion).

manière à limiter les ombres portées des uns sur les autres. Pour ce faire, la course du soleil a été étudiée afin de prédire les ombres portées sur différentes périodes de l'année et trouver la disposition la plus adéquate. [Miranville, 2002] a établi que la meilleure disposition était celle de la répartition des différents éléments selon un axe nord/sud.

Pour les besoins fonctionnels de la plate-forme, un local technique a été aménagé, permettant de centraliser les dispositifs d'alimentation du matériel et d'acquisition des mesures. En effet, les supports expérimentaux de la plate-forme sont pourvus d'appareils pour l'acquisition de mesures. Elle est à ce titre conçue pour faciliter le transfert des données de chaque cellule expérimentale, via un réseau souterrain de communication. Ce réseau comprend les câbles d'acheminement des signaux de mesures issus de chaque cellule expérimentale vers le local technique et les câbles d'alimentation électrique de tous les dispositifs concernés. Le local technique joue ainsi le rôle de poste de contrôle et centralise l'alimentation générale des systèmes et l'acquisition des données. Cette dernière opération est réalisée par un micro-ordinateur, dédié au pilotage des centrales d'acquisition de mesures. En outre la chaîne d'acquisition se compose pour les cellules ISOTEST, d'une centrale d'acquisition située dans le local technique et de multiplexeurs situés dans les cellules ; la centrale d'acquisition relative à la cellule LGI est quant à elle située dans la cellule même, pilotée à distance par le micro-ordinateur de contrôle. La Figure III.2 illustre ce fonctionnement.

Les données météorologiques du site sont quant à elles relevées grâce à une station de mesure des paramètres climatiques ; comme précédemment, l'ensemble de ces mesures fait l'objet d'une acquisition par une centrale d'acquisition de mesures, située dans un abri météorologique, les données étant transmises au local technique par le réseau de communication souterrain.

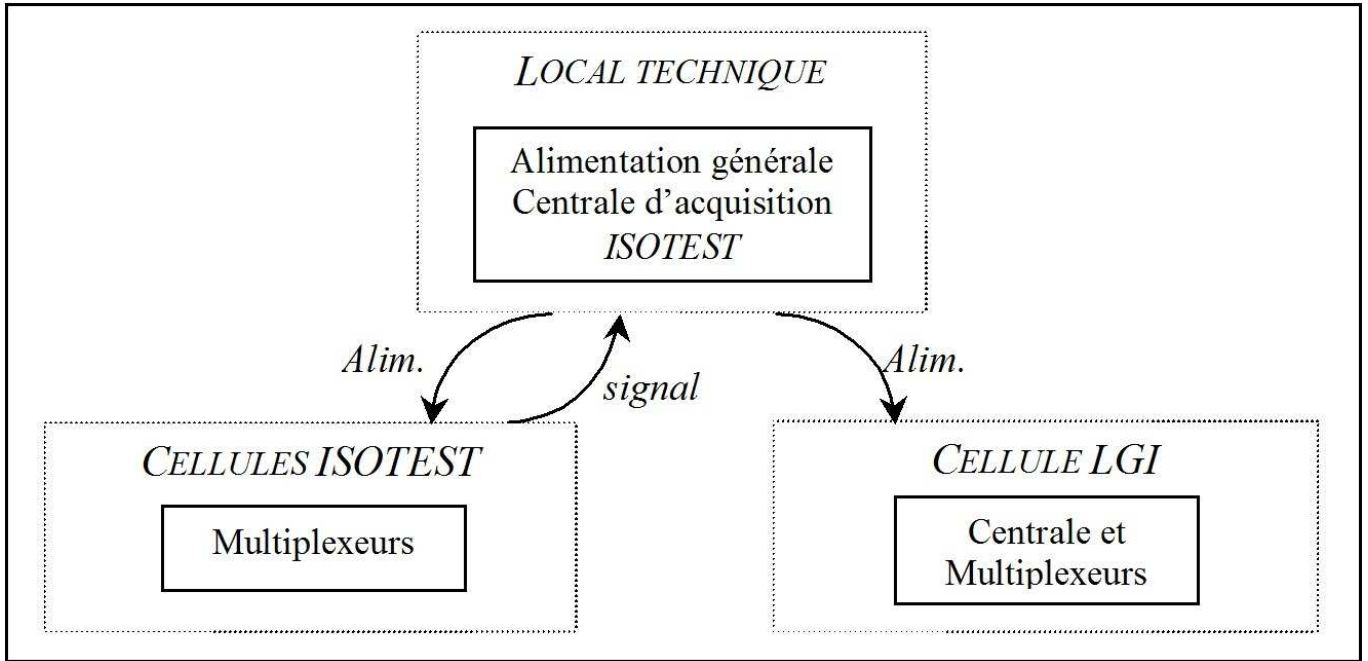


FIGURE III.2 : Synoptique des chaînes d'acquisition associées aux cellules expérimentales ISOTEST et LGI.

III.B STATION MÉTÉOROLOGIQUE

La station météorologique (cf. Figure III.3 p.88) permet le relevé en continu des informations météorologiques, nécessaires pour la réalisation des simulations au niveau du code de calcul ISOLAB. Ces informations sont récupérées toutes les minutes, et sont stockées sur le réseau de l'Université de La Réunion. La station météorologique récupère les informations suivantes :

1. la température de l'air extérieur, 3 sur la Figure III.3 ;
2. les rayonnements diffus et global extérieurs, respectivement 1 et 2 sur la Figure III.3 ;
3. la vitesse et la direction du vent, 4 sur la Figure III.3 ;
4. l'humidité de l'air extérieur, 3 sur la Figure III.3.

La partie de la station numérotée 5 sur la Figure III.3 est la centrale d'acquisition de mesures dans son abri.

Après avoir téléchargé le fichier météo correspondant à la plage temporelle sur laquelle on souhaite effectuer la simulation, il est impératif d'effectuer les traitements nécessaires afin que ce fichier soit lisible par le code de calcul utilisé, dans notre cas par ISOLAB. C'est-à-dire qu'il faut mettre les colonnes du fichier météo dans l'ordre des fichiers météos de type « .dat » utilisés par ISOLAB. De plus, il peut être nécessaire de moyenniser les données si le pas de temps du fichier météo ne correspond pas au pas de temps sur lequel on veut travailler. Un détail du fichier météorologique utilisé par ISOLAB est présenté dans le Tableau III.1.

Il est à noter que la mesure des conditions météorologiques doit se faire de manière continue tout au long de la séquence expérimentale. Une erreur de mesures de ces données peut aisément entraîner des résultats invraisemblables à l'issue de la simulation. C'est pourquoi il est nécessaire de pratiquer une

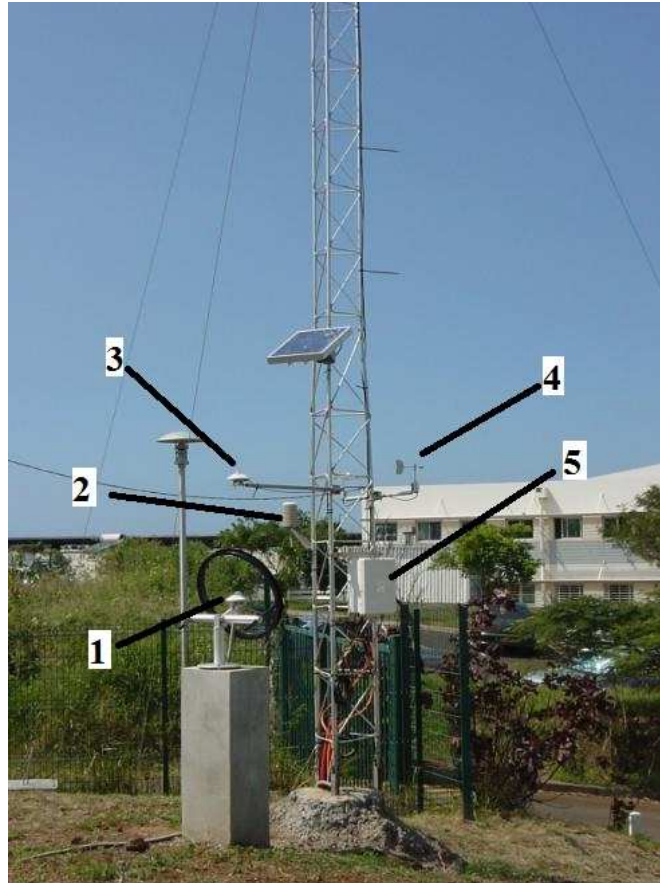


FIGURE III.3 : Station météorologique.

veille régulière et rigoureuse de cette installation, en contrôlant les appareils de mesures et en pratiquant un entretien régulier de l’environnement de la station.

Jour	Heure (hhmm)	T_{ae} (°C)	G_D ($W.m^{-2}$)	G_d ($W.m^{-2}$)	G_G ($W.m^{-2}$)	W_s ($m.s^{-1}$)	W_d (°)	HR %
1	601	23,37	1,18	11,66	12,85	0,89	306,23	78,24
1	616	23,77	17,75	22,86	40,61	0,79	315,35	77,27
1	631	24,66	64,18	34,66	98,85	0,69	307,76	74,89
1	646	25,92	106,06	40,53	146,59	0,9	44,46	71,75

Tableau III.1 : Extrait d’un fichier de données météorologiques de l’année 2009.

Par exemple, sur la deuxième ligne du Tableau III.1, on peut lire les informations mesurées par la station le premier jour de l’année (01/01/2009) à 6h16 :

- Température d’air extérieur (T_{ae}) : 23,77 °C ;
- Ensoleillement direct (G_D) : 17,75 $W.m^{-2}$;
- Ensoleillement diffus (G_d) : 22,86 $W.m^{-2}$;
- Ensoleillement global (G_G) : 40,61 $W.m^{-2}$;
- Vitesse de vent (W_s) : 0,79 $m.s^{-1}$;
- Direction du vent (W_d) : 315,35 ° ;
- Humidité de l’air extérieur (HR) : 77,27%.

Sur la Figure III.4, se trouve un extrait des données météorologiques correspondant à une étude comparative menée plus en avant sur les cellules ISOTEST.

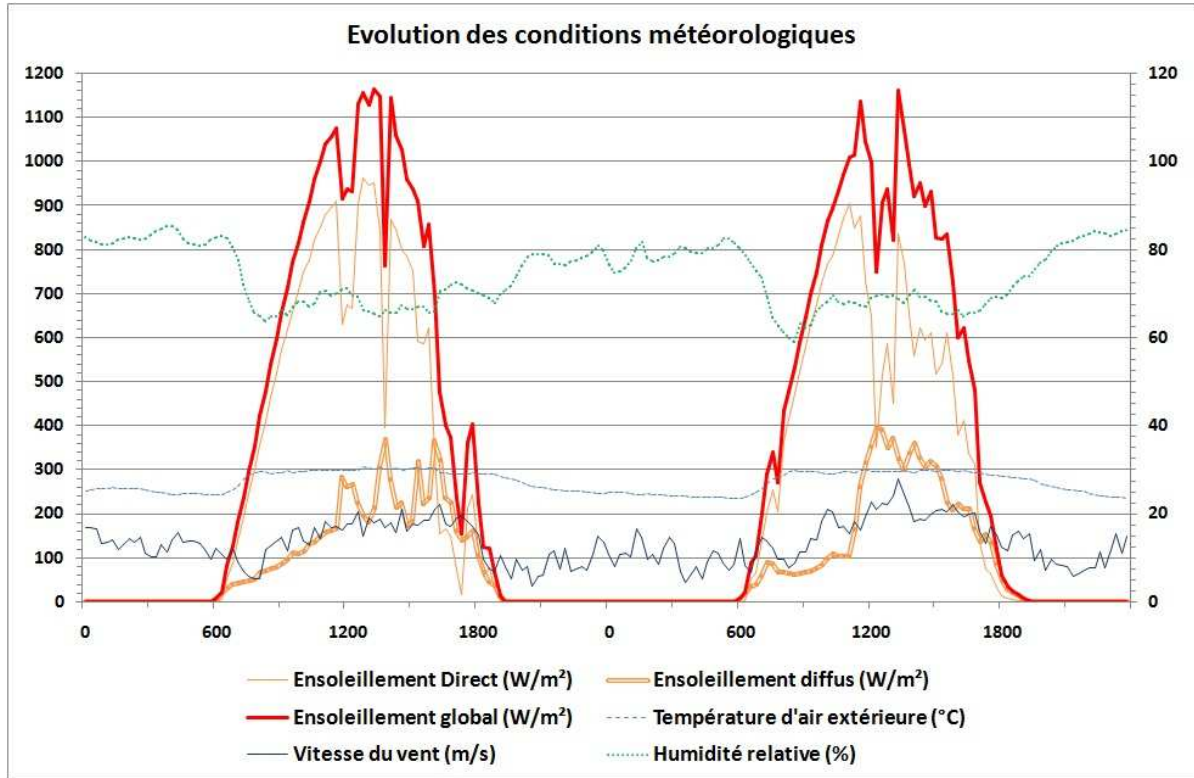


FIGURE III.4 : Données météorologiques du 8 et du 9 Janvier 2009.

III.C CELLULES À ÉCHELLES RÉDUITES ISOTEST

Les cellules ISOTEST sont au nombre de quatre (cf Figure III.5 p.90). Elles permettent de représenter des phénomènes physiques qui ont lieu dans des bâtiments à échelles réduites. Ces cellules ont un volume intérieur de $0,4\text{m}^3$ pour une hauteur au sommet de 1,2m. L'avantage de ce type de cellules est qu'elles permettent d'avoir une base d'informations plus concrète sur l'effet d'un système énergétique passif ou actif installé sur un bâtiment à moindre coût, tel que le type d'isolation thermique, le type de matériau des parois verticales, le type de toiture, etc.

Comme décrit auparavant, chaque élément de la plate-forme expérimentale est relié au local technique qui gère la récupération des mesures. Dans le cas des cellules ISOTEST, la centrale d'acquisition se situe à l'intérieur du local et des multiplexeurs situés dans chaque ISOTEST renvoient les données mesurées vers cette centrale. Ceci permet de limiter le volume utilisé par le système d'acquisition dans les ISOTEST (le multiplexeur étant plus petit), mais surtout de limiter le nombre de centrales utilisées. En effet, l'autre solution possible aurait nécessité des centrales supplémentaires (une par cellule) et dans certain cas l'association à cette centrale d'un multiplexeur, le nombre de ports disponibles sur une centrale d'acquisition étant limité.

Afin de simplifier la dénomination des différentes configurations des cellules ISOTEST, celles-ci ont été référencées de 1 à 4; elles sont bien entendu toutes identiques pour leur partie inférieure et ne diffèrent donc que par leur complexe de toiture. Le détail de ces derniers est reporté dans le Tableau III.2.

Dans le cadre de cette thèse, les cellules ISOTEST ont permis tout d'abord de mettre en évidence

Partie de la cellule	Cellules concernées	Constitution
Enceinte	1 à 4	tôle 1mm / lame d'air 116mm / placoplâtre 8mm
Complexe de toiture	1	tôle 1mm / lame d'air 116mm / placoplâtre 8mm
	2	panneau PV / lame d'air confinée / tôle 1mm / lame d'air 116mm / placoplâtre 8mm
	3	panneau PV / lame d'air ouverte / tôle 1mm / lame d'air 116mm / placoplâtre 8mm
	4	tôle 1mm / laine de roche 100mm / placoplâtre 8mm

Tableau III.2 : Constitution des cellules ISOTEST.



FIGURE III.5 : Prise de vue des quatre bâtiments à échelle réduite (ISOTEST).

l'impact thermique que peut avoir une installation photovoltaïque en toiture sur la température à l'intérieur du bâtiment. Elles ont également permis de mener une étude comparative destinée à l'évaluation de l'installation PV par rapport à d'autres types de toitures (isolées ou non). Enfin, elles ont permis de récupérer un premier jeu de données pour la phase de validation de notre modèle.

Ces séquences expérimentales seront présentées par la suite, mais il est important de décrire en premier lieu plus en détail l'expérimentation, son instrumentation, ainsi que les panneaux photovoltaïques utilisés.

III.D INSTRUMENTATION DES CELLULES ISOTEST

Les cellules ISOTEST font l'objet d'une instrumentation détaillée, que ce soit au niveau de l'enceinte que du complexe de toiture. Un soin particulier a été apporté au fait que les capteurs doivent être localisés de manière identique pour toutes les cellules. Nous sommes ainsi assurés de pouvoir comparer objectivement les valeurs issues des capteurs analogues dans nos différentes cellules.

L'enceinte de chaque cellule comporte des capteurs de température de surface sur chacune des faces intérieures (nord, sud, est et ouest). De plus, la mesure des températures d'air et de globe noir (cf Figure III.6) du volume d'air de l'enceinte est également prise.



FIGURE III.6 : Détails de l'instrumentation des cellules ISOTEST et de leur assemblage.

L'ensemble des températures est mesuré par des thermocouples de type T. Ils peuvent être plaqués sur les surfaces des parois (température de surface), insérés dans un cylindre en aluminium (température d'air) ou encore insérés dans un globe noir (température de globe noir).

Le complexe de toiture intègre les dispositifs de mesure des températures de surface de la tôle, d'isolant ou de lame d'air et du plafond, ainsi que celles des pannes constituant la charpente. Les températures d'air et de globe noir des lames d'air sont également mesurées et des fluxmètres permettent d'obtenir les flux thermiques à travers la toiture.

L'ensemble de ces capteurs est connecté à un multiplexeur, disposé dans l'enceinte de la cellule, lui-même relié à la centrale d'acquisition située dans le local technique (cf Figure III.7). Les mesures font l'objet d'une acquisition automatisée tous les quarts d'heure et sont rapatriées selon une période journalière vers le micro-ordinateur de contrôle situé dans le local technique. Ce dernier étant connecté au réseau intranet de l'I.U.T., il est possible d'accéder aux mesures à distance.

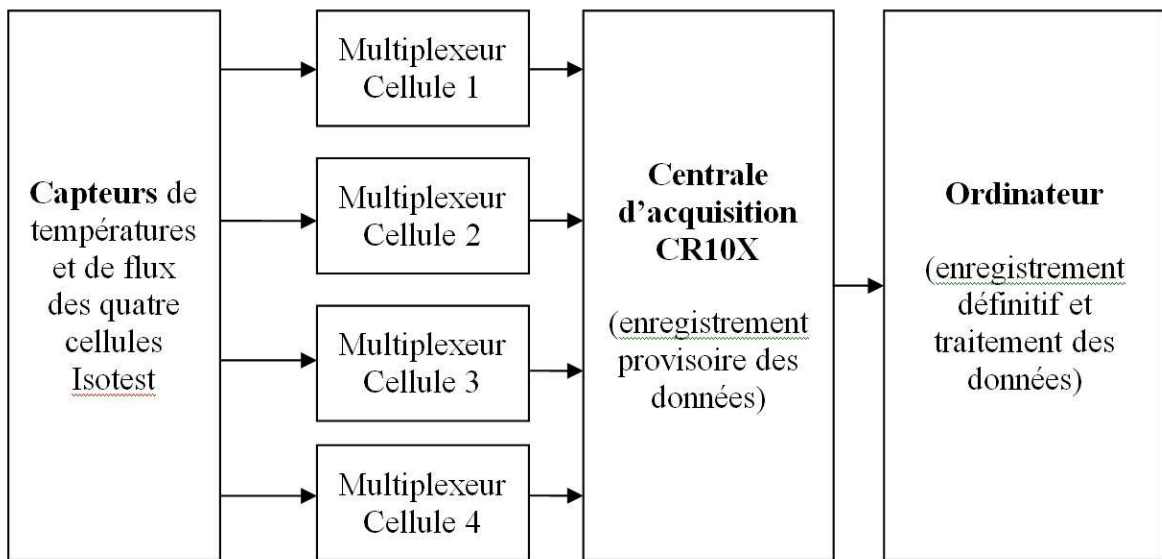


FIGURE III.7 : Synoptique de la chaîne d'acquisition de mesures des cellules ISOTEST.

III.D.1 Capteur de température de surface de paroi

La température de surface d'une paroi est mesurée en plaçant le thermocouple directement contre la paroi (cf Figure III.8). La méthode utilisée consiste à plaquer le capteur avec de l'adhésif. Pour éviter les problèmes de poches d'air sous l'adhésif (qui apportent une plus grande imprécision sur la mesure), il a été décidé d'utiliser de la colle thermo-conductrice. Cette méthode engendre une imprécision moins grande que celle d'une poche d'air, car la conductivité thermique de la colle est plus importante que celle de l'air ($0,2$ contre $0,03 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

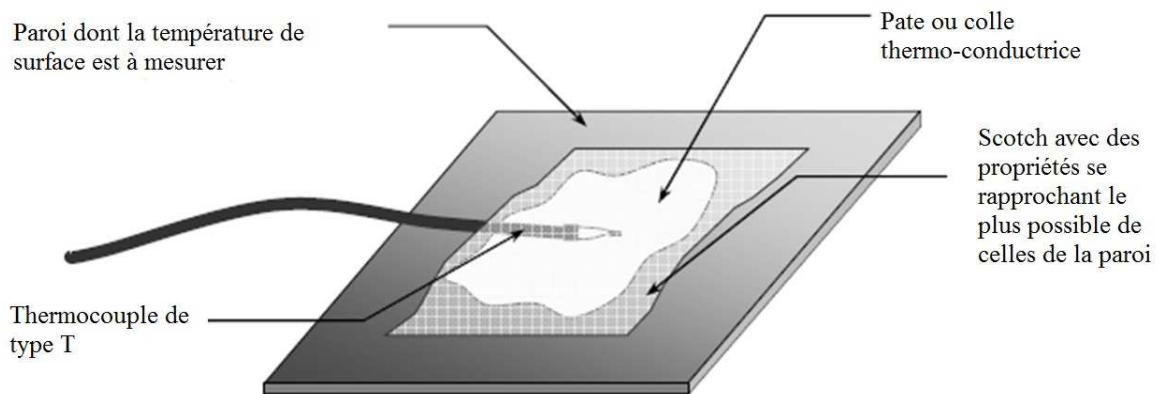


FIGURE III.8 : Capteur de température de surface de paroi.

L'ensemble des thermocouples a fait l'objet d'un étalonnage sur site; les autres capteurs ont été étalonnés en usine. L'erreur absolue des thermocouples est estimée à $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

III.D.2 Capteur de température d'air

La température d'air est mesurée en plaçant le thermocouple dans un cylindre dont les parois sont réfléchissantes (aluminium) (cf Figure III.9). Ainsi, on limite l'erreur de mesure due au rayonnement des parois de l'enceinte dans laquelle la température d'air est mesurée. Il faut dans ce cas faire attention à prendre un cylindre suffisamment long pour que cette erreur soit négligeable.

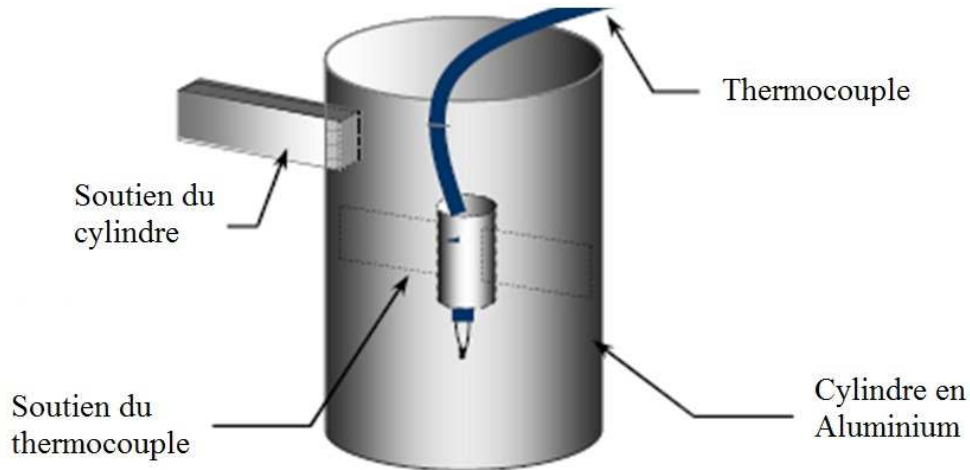


FIGURE III.9 : Capteur de température d'air.

III.D.3 Le capteur de température de globe noir

La température de globe noir se mesure, comme son nom l'indique, à l'aide d'un globe noir à l'intérieur duquel est placé le thermocouple. Cette température va permettre d'estimer approximativement si les conditions de confort sont respectées, elle correspond à la température radiante moyenne.

III.D.4 Flux-mètre

Ce capteur se présente sous la forme d'une plaque plane de cuivre plus moins longue en fonction de l'emplacement de la mesure. En la plaçant sur une paroi, on peut mesurer le flux qui traverse cette paroi. Généralement, un thermocouple y est associé afin de pouvoir mesurer la température de la paroi là où le fluxmètre est installé.

D'après les informations fournies par le constructeur, les fluxmètres fournissent des mesures entachées d'une erreur relative de 5%.

III.D.5 Multiplexeurs

Tous les capteurs (de température ou de flux) d'une cellule sont connectés à un multiplexeur, car la centrale d'acquisition (CR10X) ne comporte pas assez de ports pour une connexion directe de chacun d'eux. Le rôle des multiplexeurs est de permettre la liaison de tous les capteurs à la centrale d'acquisition, il peut sur commande choisir tel ou tel port afin de mesurer la température, le flux ou toute autre mesure ciblée.

III.D.6 Centrale d'acquisition

Les capteurs utilisés dans cette expérience sont tous de type analogique, c'est-à-dire que l'information qu'ils fournissent est continue. Dans notre cas, l'information est un signal électrique compris entre -2,5V et +2,5V. Cette information est traitée par la centrale grâce aux données techniques qui lui sont fournies par l'intermédiaire d'un programme. Ce programme décrit les différents capteurs utilisés, et leur emplacement. En ayant ces informations (type de capteur et emplacement), la centrale va puiser dans sa base de données le traitement nécessaire à la transcription du signal électrique analogique en signal numérique lisible par l'ordinateur. Le signal numérique contiendra alors la valeur de la température, ou du flux par exemple.

C'est à ce moment que la centrale enregistre les valeurs mesurées selon les consignes fournies par l'intermédiaire du programme (intervalle entre chaque mesure et emplacement des mesures). Le nombre de données mesurées et le pas de temps de mesure influent sur le temps de mesure et sur le nombre de mesures total que peut effectuer la centrale.

Pour éviter les problèmes d'effacement de données, il est nécessaire de les transférer vers un ordinateur avant que la mémoire de la centrale ne soit pleine. Pour ce faire, une récolte programmée des données a été mise en place qui permet de vider la mémoire de la centrale d'acquisition tous les soirs à minuit.

III.D.7 Calibration de l'expérimentation

Cette étape a permis de s'assurer de la conformité de l'expérimentation. En effet, avant toute prise de mesure, il est nécessaire de s'assurer du bon fonctionnement des capteurs et de la chaîne d'acquisition. En outre, lorsque l'expérimentation porte sur une analyse comparative de plusieurs systèmes, il faut également vérifier que les supports expérimentaux utilisés ont le même comportement dans les mêmes configurations.

Pour ce faire, deux étapes sont nécessaires, tout d'abord, il faut vérifier l'étalonnage des capteurs, puis vérifier la calibration des cellules ISOTEST.

III.D.7.a Étalonnage des capteurs

L'étalonnage n'a porté que sur les capteurs de températures, des thermocouples de type T fabriqués sur site, les flux-mètres étant étalonnés en usine. Le thermocouple est obtenu en appliquant un point de soudure entre les fils de constantan et de cuivre. Les extrémités non soudées sont insérées dans le multiplexeurs qui permet alors à la station d'acquisition de prendre la mesure.

Sur le support expérimental que sont les cellules ISOTEST, des thermocouples étaient déjà installés et câblés. Pour ne pas avoir à reprendre toute l'installation, 4 thermocouples neufs ont été étalonnés (cf Figure III.10). Ceux-ci ont ensuite été installés dans une des cellules ISOTEST près de quatre anciens thermocouples déjà présents dans l'expérience. Ce type d'étalonnage permet de prendre en compte l'usure des capteurs (oxydation et déformation des soudures des thermocouples).

Le but n'est pas de remettre en cause toute l'installation, mais de vérifier que celle-ci fonctionne toujours correctement. Bien sûr, le risque que la centrale d'acquisition ne soit plus correctement étalonnée existe, mais seul le constructeur est à même de l'étalonner si besoin. Pour s'en rendre compte, il suffit d'utiliser un appareil de mesure extérieur à la chaîne d'acquisition.

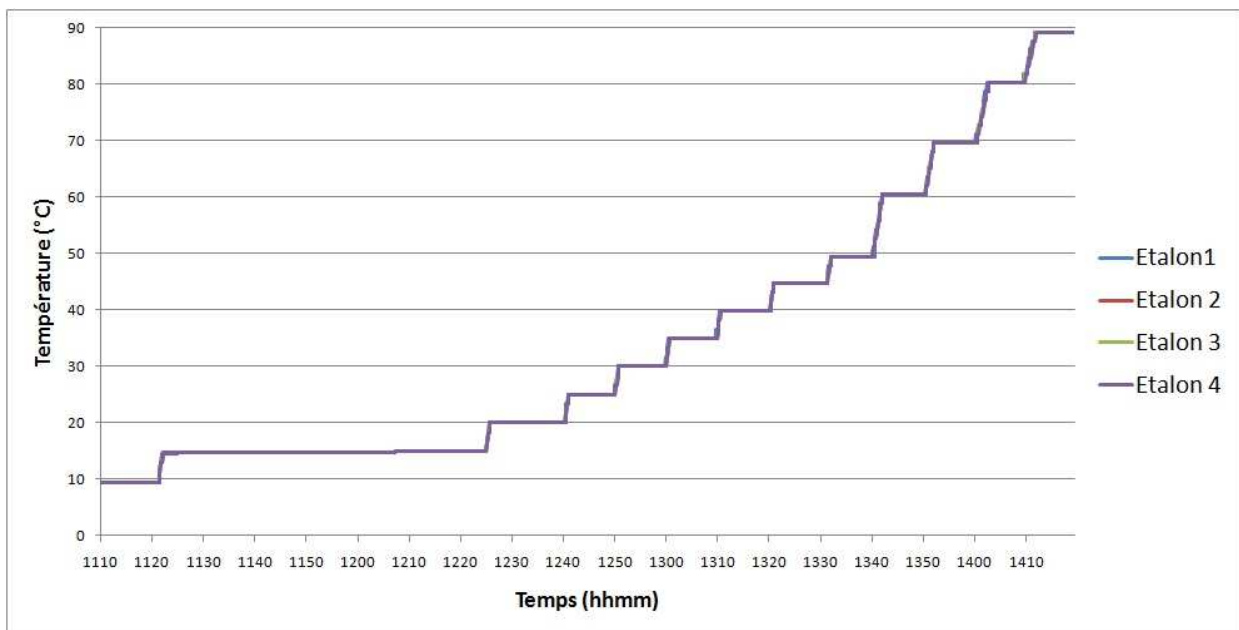


FIGURE III.10 : Etalonnage de quatre nouveaux capteurs.

La Figure III.10 présente les 4 nouveaux capteurs qui ont été étalonnés à l'aide d'un bain thermostaté. La plage d'étalonnage choisie encadre la plage de fonctionnement des capteurs. Elle est comprise entre 10°C et 90°C, avec des paliers de 5°C sur [10°C ; 50°C] et des paliers de 10°C sur [50°C ; 90°C]. L'étalonnage a montré un écart-type nul entre les quatre capteurs étalons. Ce qui permet d'affirmer qu'ils fonctionnent correctement.

L'étape suivante a consisté à placer les capteurs étalons sur l'un des supports expérimentaux (la cellule ISOTEST 4) pour vérifier que la mesure des températures était semblable pour les anciens capteurs et les capteurs étalons. Après avoir placé les capteurs étalons près de ceux déjà présents (cf Figure III.11), une campagne d'étalonnage a été menée.

La campagne d'étalonnage consiste à comparer les évolutions des températures mesurées par les anciens capteurs et les étalons. Pour ce faire, les couples de capteurs ont été placés à différents endroits de l'enceinte de la cellule (cf Figure III.11) :

1. T_{en} et T_{encal} : Températures de surface intérieure de paroi nord, respectivement pour l'ancien capteur et l'étalon ;
2. T_{es} et T_{escal} : Températures de surface intérieure de paroi sud, respectivement pour l'ancien capteur et l'étalon ;
3. T_{ee} et T_{eecal} : Températures de surface intérieure de paroi est, respectivement pour l'ancien capteur et l'étalon ;
4. T_{ea} et T_{eacal} : Températures d'air intérieur, respectivement pour l'ancien capteur et l'étalon ;

La Figure III.12 présente les résultats de la campagne d'étalonnage de la cellule 4. Les écarts moyens entre les capteurs en place et les capteurs étalons sont :

- 0,012°C pour la paroi nord ;
- 0,006°C pour la paroi sud ;
- 0,008°C pour la paroi est ;
- 0,066°C pour la température d'air.

En théorie, la centrale d'acquisition traduit de la même manière les capteurs de température similaires. Une erreur de mesure sur un capteur sera donc la même pour tous les capteurs de même type.

On peut alors considérer que les mesures faites sur les différents thermocouples de chaque cellule ISOTEST sont correctes, en partant de l'hypothèse qu'ils ont tous « vieillis de la même manière au fil

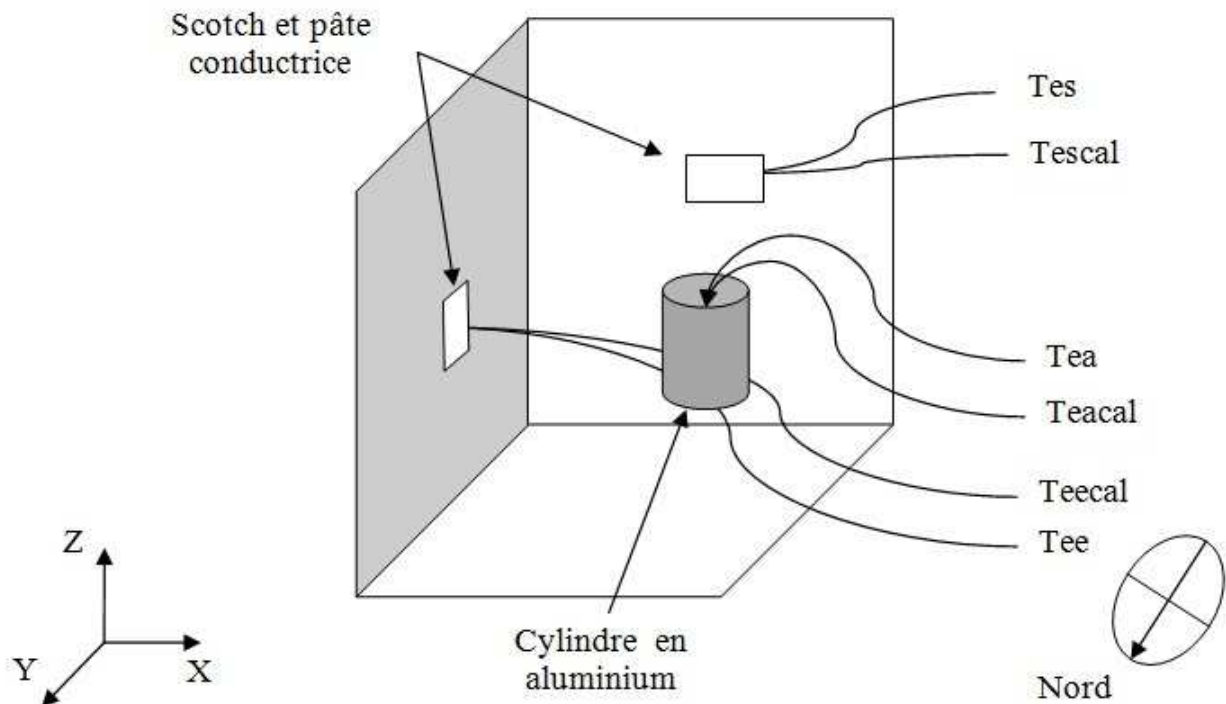


FIGURE III.11 : Schéma d'installation des capteurs de paroi (indicées "ee" et "es"), de température d'air (indicée "ea") et des capteurs étalons (indicées "cal").

des années. Et ceci car les écarts entre les capteurs en place et les capteurs étalons sont très inférieurs à l'erreur de mesure de la chaîne d'acquisition ($\pm 1^\circ\text{C}$ [Miranville, 2002]) ou du capteur ($\pm 0,5^\circ\text{C}$).

L'étalonnage terminé, il faut ensuite vérifier le comportement thermique des quatre cellules ISOTEST lorsque celles-ci sont configurées de la même manière.

III.D.7.b Campagne de calibration des cellules ISOTEST

Elle permet de vérifier que les quatre cellules se comportent de la même manière.

Sur une période de deux semaines, les températures d'air, de paroi nord, est et sud et de tôle ont été prises (cf Figure III.13, Figure III.14 et Figure III.15). Sur ces figures, les numéros 1 à 4 correspondent chacun à une des cellules ISOTEST.

Les écarts-types obtenus entre les températures des cellules lors de cette campagne de calibration sont :

- $0,23^\circ\text{C}$ pour l'air de l'enceinte ;
- $0,23^\circ\text{C}$ pour la paroi nord ;
- $0,33^\circ\text{C}$ pour paroi sud ;
- $0,27^\circ\text{C}$ pour la paroi est ;

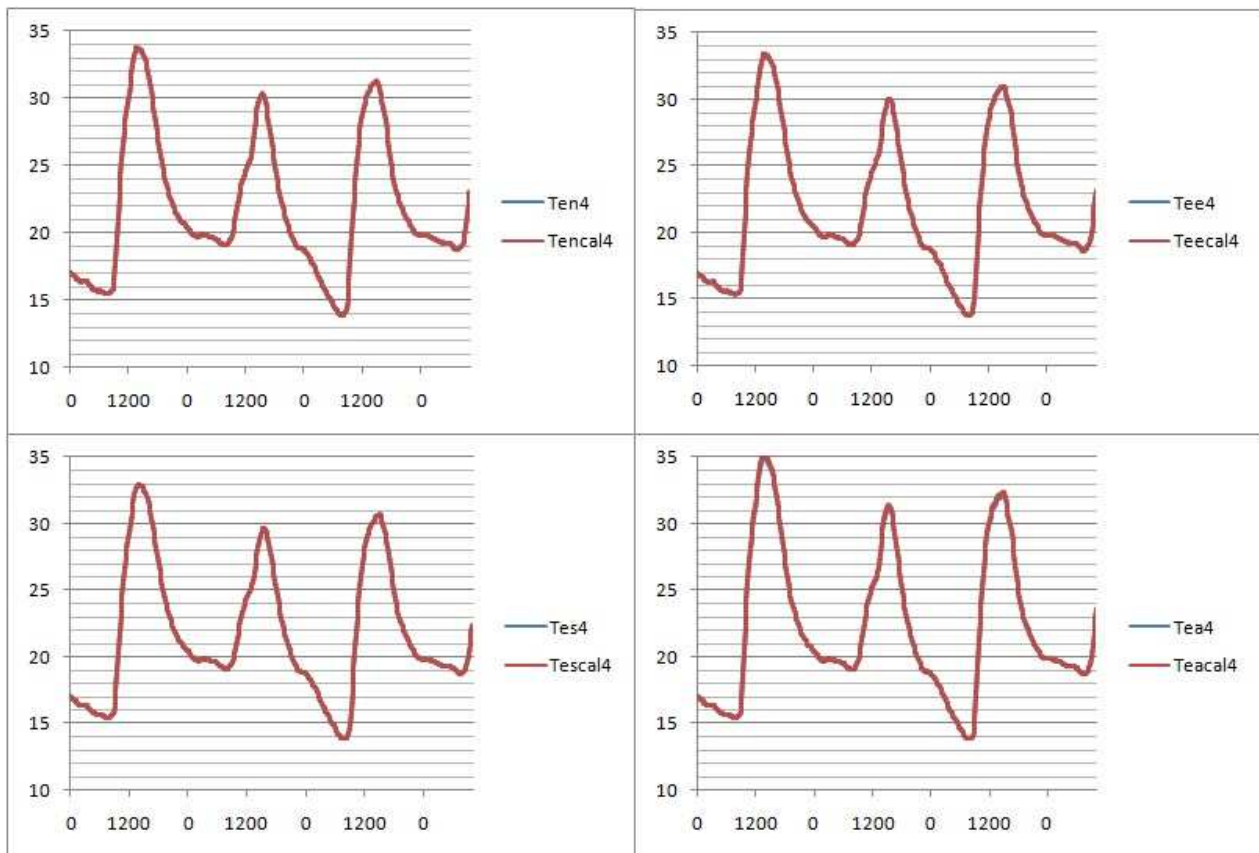


FIGURE III.12 : Comparaison des différentes températures de la cellule 4 avec les capteurs étalons.

– 0,56°C pour la tôle de toiture.

En théorie, les cellules étant identiques, ces écarts devraient être nuls. En revanche, les conditions environnementales de chaque cellule changent légèrement de l'une à l'autre vu qu'elles ne peuvent être placées exactement au même endroit. Ceci engendre de petites différences au niveau des sollicitations appliquées aux cellules (albédo, ventilation, etc.).

Ainsi, lorsque des écarts trop importants apparaissent, la centrale d'acquisition ne pouvant être mise en cause, cela a permis de mettre en évidence la défaillance d'un capteur et le remplacer. La plupart des défaillances étaient dues à une rupture de la soudure cuivre/constantan, ou à une trop grande oxydation de celle-ci.

Dans le cadre de l'expérimentation menée durant cette thèse, les écarts types présentés en amont permettent d'affirmer que les cellules réagissent de la même manière face aux sollicitations extérieures (soleil, vent, etc.). Cette affirmation est valide car les écarts sont inférieurs à l'erreur de mesure de la chaîne d'acquisition ($\pm 1^\circ\text{C}$).

La calibration des supports expérimentaux étant un succès, la suite du chapitre présentera les panneaux photovoltaïques installés sur les toitures des cellules ISOTEST et les séquences expérimentales menées.

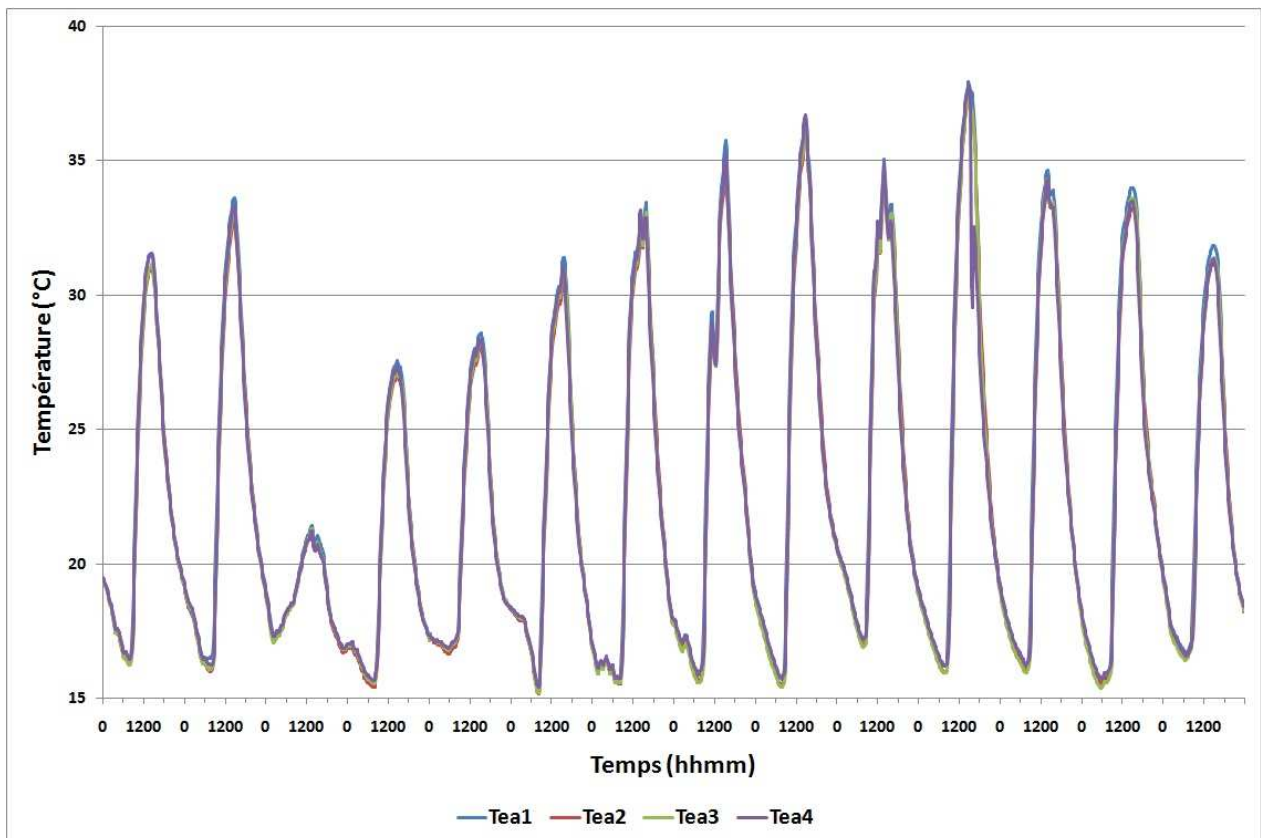


FIGURE III.13 : Campagne de calibration, étude de la température de surface intérieure de paroi nord (Ten).

III.E L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

Deux panneaux photovoltaïques ont été installés sur les toitures de deux des ISOTEST. Ils ont été choisis en fonction essentiellement de leur dimensions. En effet, pour avoir des séquences expérimentales avec des données exploitables, il a fallu choisir des panneaux ayant des dimensions se rapprochant le plus possible des dimensions de la toiture. Ceci afin de pouvoir considérer que toute la surface de la toiture était recouverte par le système photovoltaïque et pouvoir le comparer à d'autres complexes de toiture (par exemple, les toitures pourvues d'un isolant thermique). De plus, afin de faciliter l'installation du système sur la toiture, et vu les faibles dimensions de celle-ci, le choix s'est orienté vers un système à un seul panneau.

Le panneau le plus adéquat disponible sur le marché était un Kyocera de 65W de puissance nominale (cf. Figure A - 56 en annexes p.194). Ce panneau couvre la totalité de la toiture de par ces dimensions (751mm x 652mm). Le rendement des cellules photovoltaïques qui le composent atteint 16%, mais son rendement propre est d'environ 13,3%.

Pour correspondre aux conditions de mise en œuvre habituelles de ce type de panneau sur les toitures de bâtiments, deux cornières en bois ont été utilisées pour créer une lame d'air de 4cm d'épaisseur sous le panneau PV (cas 2 et 3 du Tableau III.2 p.90). Ces cornières étaient fixées au panneau dans le sens de sa longueur, puis fixées à la toiture dans le sens d'inclinaison de celle-ci. Ainsi, les deux ISOTEST concernées comprenaient chacune une lame d'air ouverte au-dessous de leur panneau PV. Afin d'obtenir

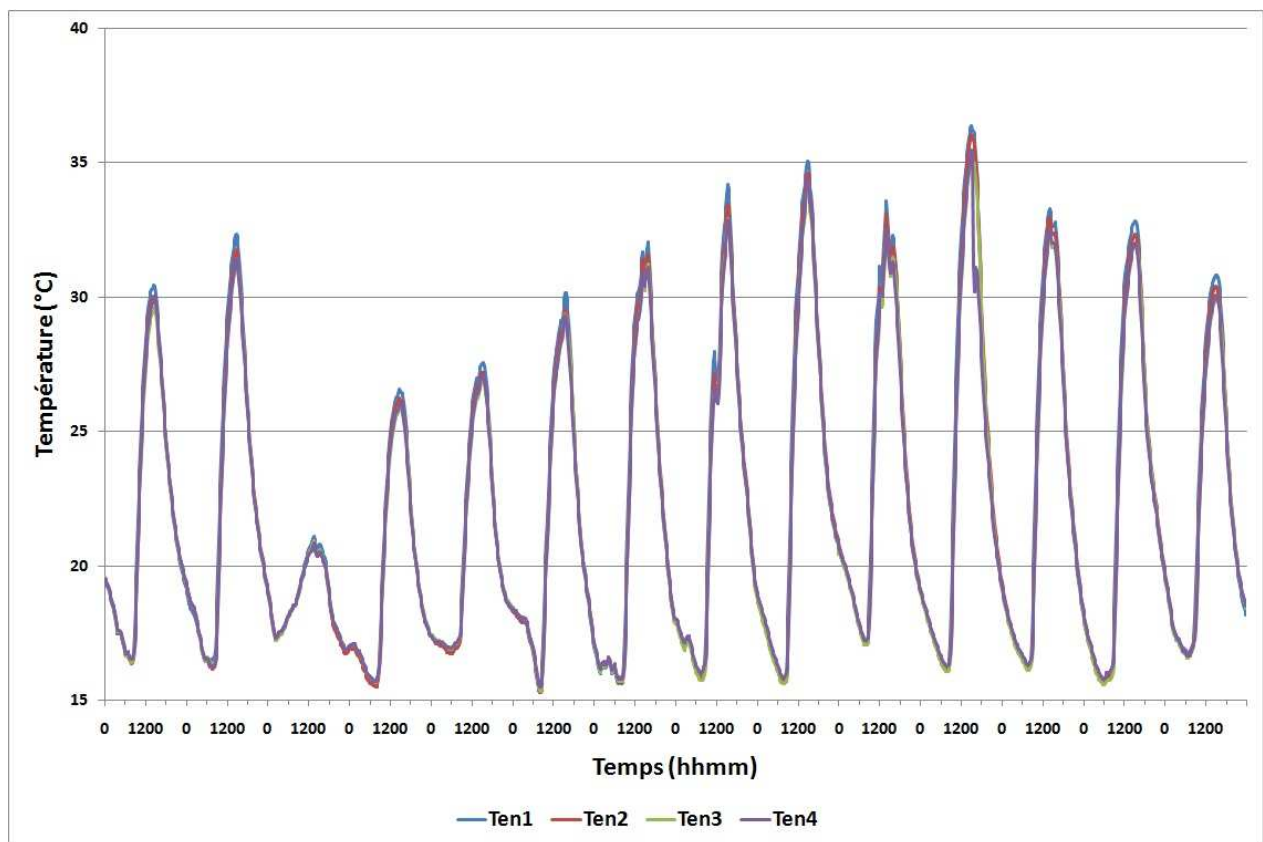


FIGURE III.14 : Campagne de calibration, étude de la température d'air de l'enceinte (Tea).

le cas de l'ISOTEST 2 décrit dans le Tableau III.2 p.90, c'est-à-dire le cas où la lame d'air sous le panneau PV est confinée, une mousse polyuréthane (isolante) a été utilisée pour fermer la lame d'air.

Comme pour les autres complexes de toiture, des capteurs de températures et de flux ont été installés. Il s'agit des capteurs de température dans la lame d'air située sous le panneau PV, de température et de flux sur la face inférieure (à l'ombre) du panneau PV.

Les panneaux photovoltaïques ont ensuite été connectés au système de mesure électrique présenté ci-après.

III.F MESURE DES DONNÉES ÉLECTRIQUES DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

La mesure des données électriques du panneau photovoltaïque, telles que le productible, la tension et l'intensité, n'a pas été possible. Les spécificités de l'installation, la taille réduite d'un panneau (751mm x 652mm) et sa tension trop faible, ont fait qu'il n'était pas possible d'exploiter directement l'électricité produite par chaque panneau photovoltaïque séparément. Ceci est dû au fait que pour s'affranchir des difficultés de modélisation électrique des systèmes alimentés par l'énergie des panneaux PV, un régulateur de charge capable de choisir le meilleur point de fonctionnement (I, V) du système PV en fonction de la puissance appelée a été mis en place. Ce régulateur, un Outback MPPT 60A, le moins puissant disponible sur le marché, ne supporte pas de tensions inférieures à 24V au niveau de la puissance produite par

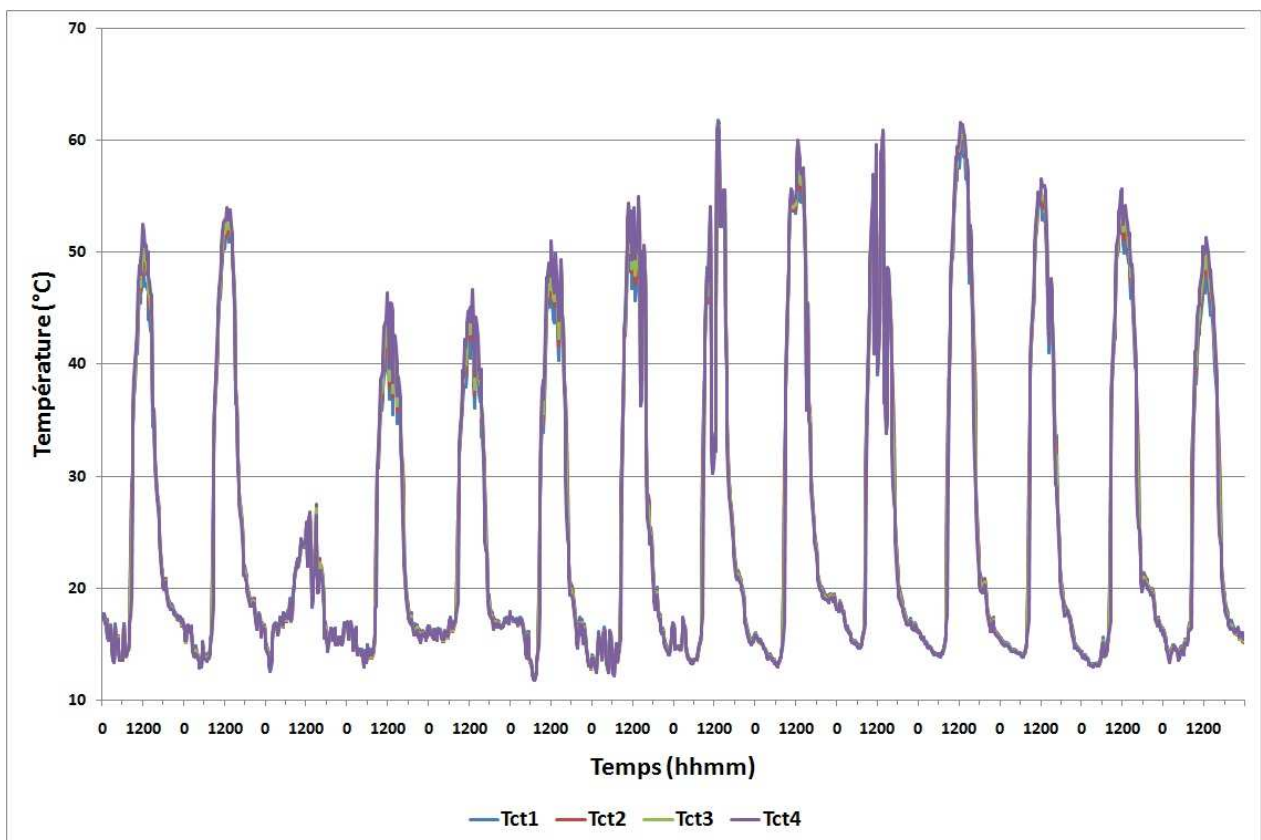


FIGURE III.15 : Campagne de calibration, étude de la température de surface intérieure de la tôle (Tct).

les panneaux photovoltaïques. Or, ceux-ci ont une tension de production nominale d'environ 17V par panneau. Il a donc fallu connecter les panneaux des deux ISOTEST qui en étaient équipées en série, afin d'atteindre une tension suffisante pour que le régulateur de charge puisse correctement fonctionner. En revanche, cette configuration assure l'utilisation du maximum de puissance disponible aux panneaux.

Étant donné ces caractéristiques de l'installation et afin d'être capable de modéliser correctement la production photovoltaïque, une charge a été connectée sur la sortie du régulateur de manière à ce que la totalité de la puissance disponible soit effectivement produite. Pour ce faire, une batterie dans une situation de charge partielle permanente a été utilisée, l'installation PV fournissant alors l'électricité nécessaire à la charge de cette batterie. Pour s'assurer que la batterie soit toujours en état de charge, une lampe a été placée sur un circuit parallèle. Cette dernière s'allumait avant le seuil où la batterie était chargée grâce à un relais, assurant ainsi une demande d'énergie constante à l'installation PV (cf Figure III.16).

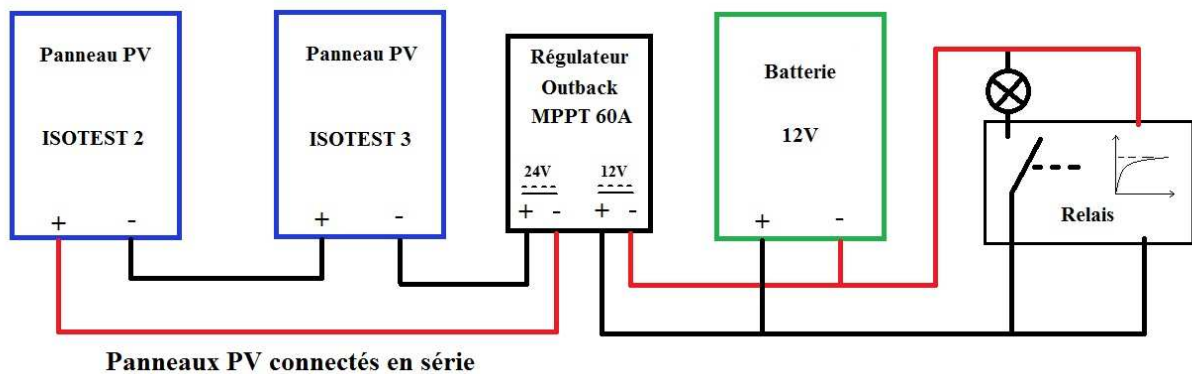


FIGURE III.16 : Schéma de l'installation électrique.

Cette configuration permet l'utilisation d'un modèle numérique électrique existant et validé comme source de données électriques (productible, tension, courant) pour l'optimisation du modèle de panneau PV présenté dans cette thèse. Cette nécessité vient du fait que le modèle radiatif ne peut fournir que la puissance maximale disponible au niveau des panneaux photovoltaïques. Pour cette expérimentation, il n'est pas possible de mesurer les caractéristiques électriques du système tout au long de l'expérimentation. Il a donc fallu trouver un autre moyen d'exploiter l'expérimentation. S'assurer que le productible était le maximum disponible, a permis de contourner ce problème.

La puissance prédite par le modèle radiatif devra par la suite être couplée à un modèle électrique du système auquel les panneaux fournissent de l'énergie, pour savoir dans quelles mesures cette puissance est utilisée et ce que cela engendre sur le comportement thermique du panneau photovoltaïque. Mais ce point d'étude ne fait pas partie des objectifs de cette thèse. Le cas qui doit être modélisé correspond au cas idéal où toute la puissance fournie par les panneaux est utilisée (par exemple lors de la revente à EDF, où la totalité de la production est envoyée sur le réseau électrique par l'intermédiaire d'un régulateur ou d'un transformateur). Le choix qui a été fait correspond donc bien aux objectifs de cette thèse.

III.G SÉQUENCES EXPÉRIMENTALES

Au cours de cette thèse, deux types de séquences expérimentales ont été menées sur les cellules ISOTEST. La première consistait à évaluer l'impact d'une installation photovoltaïque sur la température du bâtiment. La seconde, consistait à étudier de manière comparative différents types de toiture : une toiture simple traditionnelle, une toiture isolée à l'aide de laine de roche et deux toitures photovoltaïques (l'une équipée d'une lame d'air sous panneau PV ventilée et l'autre d'une lame d'air non ventilée).

III.G.1 Impact d'une installation PV sur la température dans le bâtiment

Cette première séquence d'expérimentation consistait à déterminer si, à La Réunion, une installation photovoltaïque en toiture pouvait avoir une incidence sur la température sèche d'air intérieure du bâtiment, et ce dans le cadre d'une protection solaire. Elle a lieu au tout début de ce travail de thèse, alors que l'installation PV n'était pas encore en état de produire de l'électricité. Il était intéressant de mener cette expérimentation dans le sens où l'un des principaux paramètres agissant sur le confort thermique dans le bâtiment est sa température intérieure.

L'expérimentation a donc consisté à étudier de manière comparative la cellule ISOTEST de référence et une cellule équipée en toiture d'un panneau photovoltaïque (cf Figure III.5 p.90).

Cette séquence a montré qu'une diminution de l'ordre de 3 à 4°C était possible (voir Figure III.17) à La Réunion. Cet impact est très intéressant, car il est du même ordre que l'effet dû à une isolation. Sur le bâtiment en site réel, une étude similaire a été menée et a donné des résultats allant dans le même sens [Dominguez *et al.*, 2011]. A partir de là, les étapes suivantes de la thèse ont été mises en place, notamment la modélisation physique des systèmes photovoltaïques, les expérimentations permettant la validation de ce modèle, ainsi qu'une séquence expérimentale plus approfondie dont le but a été l'étude comparative présentée ci-après.

Lors de prochaines expérimentations, il serait intéressant d'étudier l'impact de la production d'électricité sur la température de l'enceinte du bâtiment et donc sur le confort si les supports expérimentaux adéquats sont disponibles. Pour ce faire, il faudrait avoir deux bâtiments similaires équipés tous les deux d'installations photovoltaïques sur les mêmes parois (la toiture par exemple), mais ne pas connecter l'une des deux installations afin que l'un des deux bâtiments soit en état de production d'électricité et pas l'autre. De là, nous pourrions observer l'évolution des champs de températures des deux bâtiments et voir si une différence significative apparaît.

III.G.2 Etude comparative de l'installation PV semi-intégrée en toiture

L'étude comparative a comporté plusieurs configurations de toiture sur les quatre ISOTEST disponibles (cf Figure III.18 p.104) :

1. Sans isolation et sans panneau photovoltaïque ;
2. Sans isolation et avec panneau photovoltaïque et lame d'air sous panneau non ventilée ;
3. Sans isolation et avec panneau photovoltaïque et lame d'air sous panneau ventilée ;

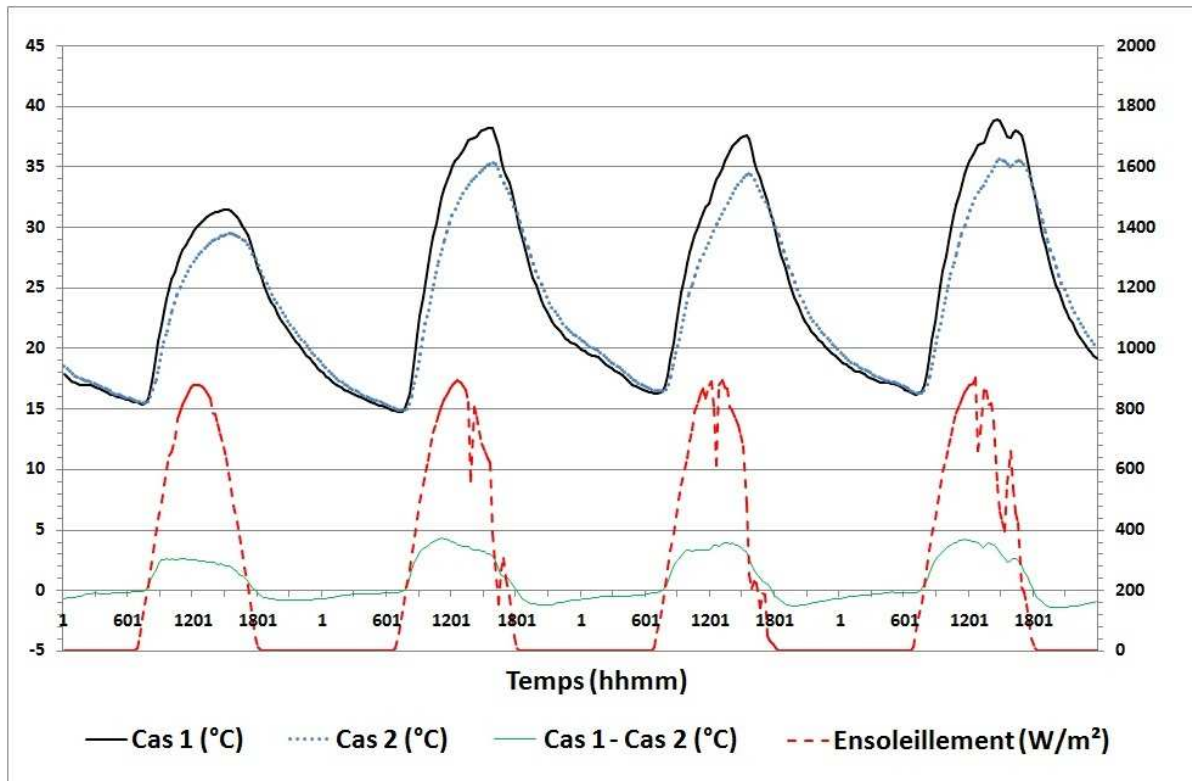


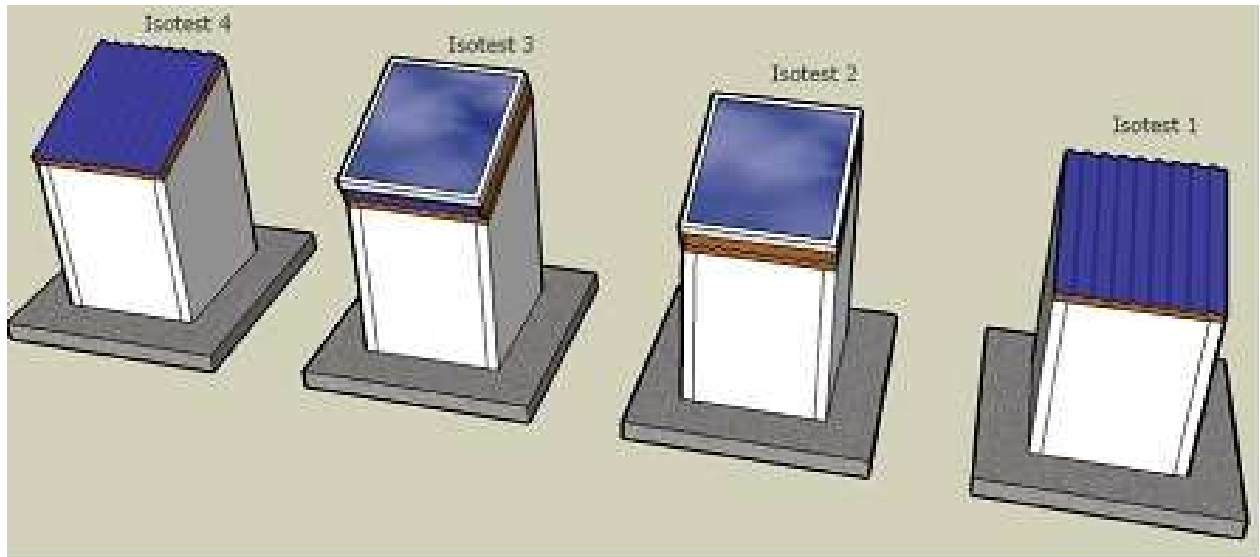
FIGURE III.17 : Impact d'une installation photovoltaïque sur la température d'air à l'intérieur du bâtiment.

4. Avec isolation traditionnelle (10cm de laine de roche) et sans panneau photovoltaïque.

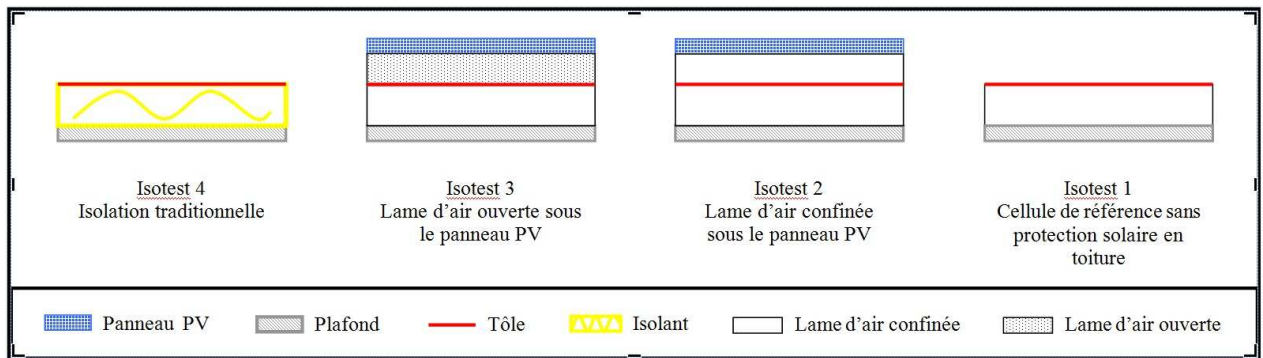
Cette étude a permis de quantifier précisément l'impact d'une installation photovoltaïque sur la température à l'intérieur du bâtiment, et de le comparer à l'impact d'une isolation traditionnelle en toiture utilisée à La Réunion. L'étude a été menée sur plusieurs mois de 2009 à 2011. La période choisie a été celle de l'été 2008-2009 qui, à La Réunion, correspond au mois de Novembre à Mars. Les résultats présentés sur la Figure III.19 sont extraits des mesures faites au mois de Janvier 2009, plus précisément le 8 et le 9.

Sur la Figure III.19, nous constatons tout d'abord que l'installation photovoltaïque avec lame d'air ventilée est plus efficace pour limiter la température à l'intérieur du bâtiment que celle avec une lame d'air non ventilée sous le panneau, avec une diminution de la température de l'enceinte de l'ISOTEST pouvant aller jusqu'à 6°C contre 3,5°C pour la lame d'air confinée. Ceci s'explique par le fait qu'il y a un renouvellement d'air sous le panneau dans la configuration 3, qui participe au refroidissement du panneau, de la toiture de la cellule ISOTEST, et par conséquent au refroidissement de l'enceinte.

De plus, si on compare les comportements des cellules 3 et 4, il est clair qu'elles sont presque similaires. En effet, il n'y a qu'un degré d'écart entre les deux configurations lorsque l'ensoleillement est le plus fort, ce qui permet d'avancer l'hypothèse que l'installation photovoltaïque semi-intégrée en toiture avec lame d'air sous panneau ventilée est presque aussi efficace qu'une isolation traditionnelle de 10cm de laine de roche. Dans certains cas, il pourrait être possible de se passer de l'isolation traditionnelle lorsque la toiture est équipée de panneaux photovoltaïques installés selon la configuration 3, dans des conditions expérimentales identiques.



(a) Vue des cellules dans leur environnement



(b) Vue en coupe du complexe de toiture

FIGURE III.18 : Les quatre cellules ISOTEST équipées pour l'étude comparative.

Cette étude comparative n'a pas eu pour but que de quantifier l'impact de l'installation PV sur la température de l'enceinte, mais également de constituer deux jeux de données expérimentales afin de valider le modèle présenté précédemment dans les configurations 2 et 3. Il faut garder à l'esprit que ces deux configurations semi-intégrées sont aussi représentatives des configurations intégrées, et des configurations où la vitesse d'écoulement dans la lame d'air sous le panneau est contrôlée.

Enfin, la configuration avec lame d'air ventilée naturellement semble être la plus adéquate pour maximiser le rendement photovoltaïque de l'installation car elle permet de diminuer encore plus la température du panneau PV (cf Figure III.20).

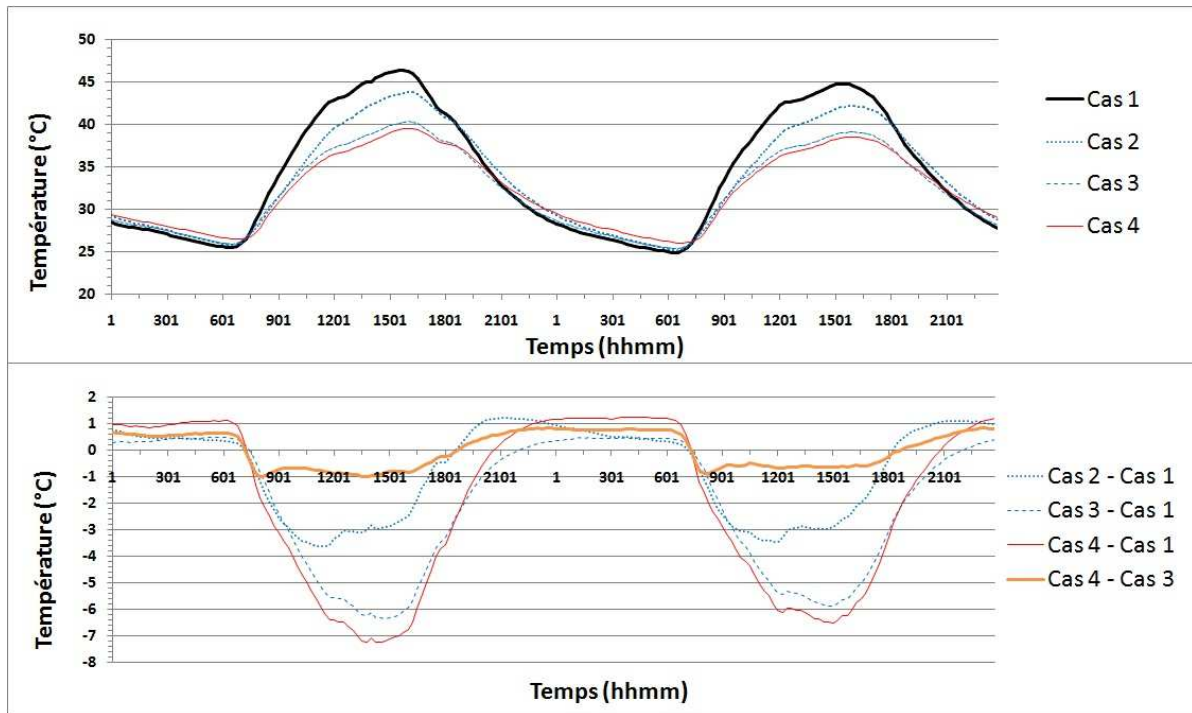


FIGURE III.19 : Résultats de l'étude comparative (mesures prises les 8 et 9 Janvier 2009).

III.H CONCLUSION DU CHAPITRE III

Ce chapitre a présenté les supports expérimentaux avec lesquelles une séquence de données de validation expérimentale a été récoltée.

Tout d'abord, la plate-forme expérimentale du laboratoire PIMENT, située à l'IUT de Saint-Pierre (La Réunion), a été décrite ainsi que sa chaîne d'acquisition de mesures.

Ensuite, les différents supports qui la composent ont été détaillés. Ces supports comprennent une station météorologique, un ensemble de 4 bâtiments à échelles réduites (ISOTEST) et un bâtiment à échelle 1 (LGI). Cette dernière n'a pas été utilisée au cours de cette thèse, mais fera certainement l'objet de futures études, elle est d'ailleurs le support expérimental principal d'un projet qui a été labellisé par le pôle de compétitivité Capenergies (cf. Partie E en annexes p.186).

La station météorologique est un élément clé de la plate-forme, car elle fournit les informations nécessaires au lancement des séquences de simulation au niveau du code de calcul. Afin d'éviter et/ou de limiter les erreurs de mesures, qui peuvent engendrer une mauvaise prédiction du modèle, il faut s'assurer du bon fonctionnement de la station par une veille régulière de ses différents éléments (en particulier au niveau du capteur mesurant le rayonnement solaire diffus). Ce n'est qu'à cette condition que la fiabilité des données météorologiques sera assurée.

Les cellules ISOTEST, quant à elles, ont été les supports expérimentaux choisis pour mener à bien le processus de validation expérimentale. Au nombre de 4, elles ont permis de mener deux séquences expérimentales décrites ci-après. Ces cellules ont été instrumentées de manière à mesurer les températures des différents éléments constituant le bâtiment (parois verticales, complexe de toiture, air de l'enceinte)

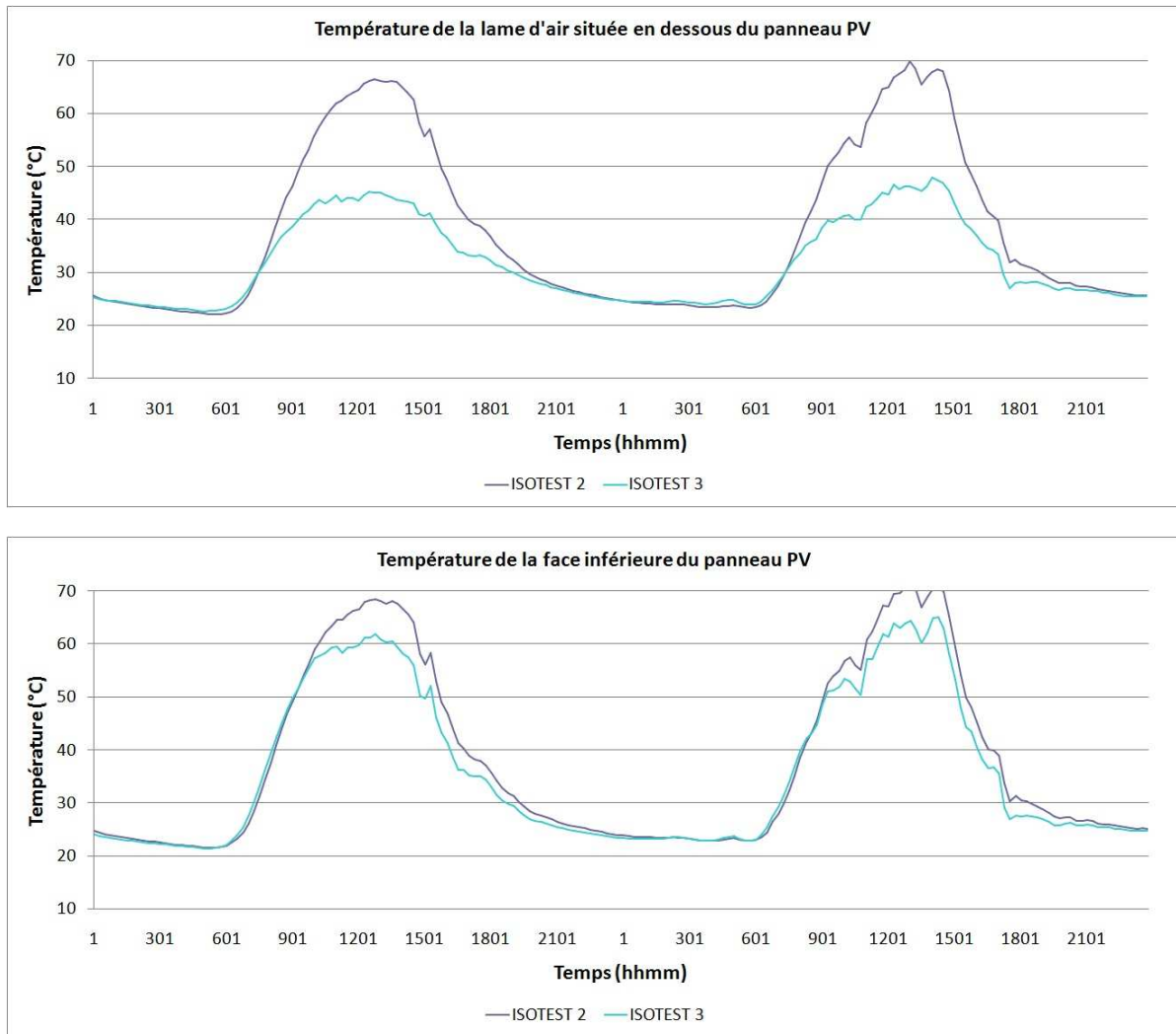


FIGURE III.20 : Comparaison de l'influence des deux types de toiture PV sur les températures du panneau et de la lame d'air sous panneau.

et calibrées, afin de s'assurer qu'elles avaient des comportements thermiques similaires.

De plus, sur les toitures de deux des cellules ISOTEST des panneaux photovoltaïques ont été installés, ce qui a abouti aux configurations de toiture suivantes :

1. Sans isolation et sans panneau photovoltaïque (cellule de référence) ;
2. Sans isolation et avec panneau photovoltaïque et lame d'air sous panneau non ventilée ;
3. Sans isolation et avec panneau photovoltaïque et lame d'air sous panneau ventilée ;
4. Avec isolation traditionnelle (10cm de laine de roche) et sans panneau photovoltaïque.

Une première séquence expérimentale effectuée sur les cellules ISOTEST 1 et 2 a mis en évidence l'impact que peut avoir une installation solaire photovoltaïque sur la température de l'air de l'enceinte du bâtiment. Dans le cas d'une lame d'air confinée, une diminution de l'ordre de 3 à 4 °C de la température d'air de l'enceinte de la cellule 2 par rapport à la cellule de référence a pu être notée.

Une seconde séquence expérimentale a alors été lancée, cette fois-ci sur les quatre cellules afin de comparer deux complexes de toitures photovoltaïques à un système de protection solaire traditionnelle-

ment utilisé (la laine de roche). Les mesures effectuées au mois de Janvier 2009 ont confirmés les résultats de la première séquence expérimentale. De plus, il a été observé que la toiture photovoltaïque équipée d'une lame d'air ventilée était plus efficace en termes de protection solaire que celle avec une lame d'air confinée (6°C de diminution de la température d'air de l'enceinte par rapport à la cellule de référence contre 3,5°C).

Cette seconde séquence a également montré que l'impact de la toiture PV équipée d'une lame d'air ventilée sur la température d'air de l'enceinte était comparable à celui d'une toiture équipée d'un isolant thermique traditionnel (environ 6°C). Ce qui semble être un argument de poids pour favoriser l'utilisation de tels systèmes, qui permettraient alors non seulement de produire une énergie propre et renouvelable, mais aussi d'améliorer le bilan énergétique du bâtiment du point de vue du confort thermique.

Enfin les données expérimentales recueillies lors de cette séquence pourront être utilisées pour valider le modèle. Cette dernière étape est présentée dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE IV

VALIDATION DE MODÈLE ET OPTIMISATION PARAMÉTRIQUE

Ce chapitre apportera des éléments permettant d'éprouver le modèle de panneau photovoltaïque qui a été présenté au Chapitre II. Il sera constitué de quatre parties. La première partie présentera le processus de validation. La deuxième partie présentera l'étude qui a été faite sur les cellules ISOTEST. Cette dernière sera constituée de quatre sous-parties présentant la confrontation du modèle aux mesures, l'analyse de sensibilité, l'optimisation, et la validation. Une quatrième partie présentera des applications du code à des cas d'étude courants. Enfin, une conclusion permettra de rappeler les différents points abordés dans ce chapitre ainsi que les informations permettant de valider ou non le modèle thermique de panneau photovoltaïque couplé au bâtiment.

Remarque : Le modèle de paroi photovoltaïque doit être capable de modéliser une paroi constituée totalement ou en partie de couches semi-transparentes, dont certaines peuvent être photovoltaïques. Ce chapitre traitera donc de la validation de ce modèle pour les ISOTEST 2 et 3 (équipées de panneau PV), étant entendu que les deux autres ISOTEST ne nécessitent pas le modèle de panneau PV, la modélisation traditionnelle d'*ISOLAB* étant suffisante.

IV.A MÉTHODOLOGIE DE VALIDATION

La méthodologie de validation d'un modèle numérique inclut les deux étapes suivantes :

1. La confrontation à d'autres modèles numériques déjà validés ;
2. La confrontation à des données expérimentales en environnement contrôlé ou réel.

La méthode qui a été choisie pour cette thèse est la seconde, de confrontation à des données expérimentales, car aucun modèle numérique existant ne permettait d'obtenir les résultats escomptés avec le modèle qui a été créé : c'est-à-dire la température de l'enceinte du bâtiment couplé à la température du panneau photovoltaïque et à sa production électrique. De plus, l'étude présentée ci-après a été menée sur des installations photovoltaïques situées en environnement réel sur les cellules ISOTEST de la station expérimentale de l'IUT de Saint-Pierre (île de La Réunion), comme indiqué au Chapitre III.

Que ce soit par confrontation expérimentale ou numérique, le processus de validation restera le même :

1. Comparaison des résultats du modèle aux données expérimentales ou numériques ;
2. Identification des paramètres à la source de l'erreur si la confrontation montre un écart trop important ;
3. Optimisation des paramètres identifiés ;
4. Nouvelle confrontation, et validation si l'écart entre les résultats du modèle et les données expérimentales ou numériques est acceptable.
5. Corroboration des résultats sur une ou plusieurs autres périodes d'étude.

Cette démarche de validation se présentera selon le processus suivant :

1. Confrontation des résultats aux mesures :
 - ✓ Si l'écart modèle - mesure est acceptable (inférieur à 10%), le modèle est **validé** ;
 - ✗ Sinon, l'étape suivante du processus de validation est mise en oeuvre ;
2. Analyse de sensibilité : identification des paramètres les plus influents sur la sortie modélisée ;
3. Optimisation des paramètres mis en cause lors de l'analyse de sensibilité ;
4. Confrontation du modèle optimisé aux mesures :
 - ✓ Si l'écart modèle - mesure est acceptable (inférieur à 10%), le modèle est **validé** ;
 - ✗ Sinon, on revient à l'étape 3 du processus de validation en augmentant ou en changeant la palette de paramètres à optimiser ;
5. Corroboration des résultats : si le modèle est valide pour une autre période avec des conditions environnementales différentes, c'est qu'il peut être élargi à d'autres cas.

Le modèle peut être considéré comme valide lorsqu'il est capable de prédire l'évolution des températures du bâtiment à 10% près de leurs plages de variation respectives. En ce qui concerne la prédiction du productible photovoltaïque, le modèle sera validé pour une erreur de 1% par rapport aux prédictions du modèle à simple diode. Ces hypothèses de validation sont appliquées aux étapes de comparaison modèle/mesure et après optimisation, si optimisation il y a.

Les étapes d'identification des paramètres potentiellement sources d'erreur et d'optimisation de ceux-ci se sont appuyées sur des travaux existants. La première, l'identification des paramètres s'est faite au travers d'une analyse de sensibilité. La seconde, l'optimisation des paramètres du modèle, a été menée grâce à l'utilisation de GenOpt [Wetter, 2009], un logiciel d'optimisation. Ces deux étapes sont décrites par la suite dans cette partie.

Pour que le processus de validation du modèle thermique de panneau PV soit optimum, le choix a été fait de vérifier tout d'abord la justesse du modèle de bâtiment appliqué au cas de l'ISOTEST 1. Le code ISOLAB a déjà été validé pour des bâtiments à échelle réelle grâce à la procédure BESTEST [Judkoff et Neymark, 1995], mais cette vérification n'a été menée que dans le souci de minimiser les erreurs de modélisation issues de la modélisation du bâtiment lui-même (ici les ISOTEST). Un fichier de description des modules ISOTEST existait déjà incluant des données physiques et géométriques associées aux différentes parties du bâtiment. Ce fichier décrit correctement la configuration du bâtiment à son état neuf. Cependant, certains de ses paramètres physiques peuvent évoluer au cours de la vie d'un bâtiment, comme par exemple les propriétés radiatives de ses surfaces extérieures (dégradations dues à l'environnement ou à l'utilisation du bâtiment), ou encore les propriétés physiques de certains isolants

thermiques, qui peuvent varier (laine de roche ou fibre de verre). De plus, le modèle radiatif utilisé dans le fichier d'origine n'était pas exploitable pour cette étude, de part les méthodes de couplage et leur implémentation particulière. Cependant, à terme, les autres modèles pourront également faire l'objet d'un couplage.

Premièrement, le processus de validation a donc été appliqué à la cellule équipée d'une toiture simple (cellule 4), sans isolation ni panneau photovoltaïque. Ceci dans le but de s'assurer des fiabilités du fichier de description du bâtiment de base et de la méthode de validation.

Deuxièmement, le processus de validation a été appliqué aux deux cas de bâtiments BIPV : les cellules ISOTEST 2 et 3, respectivement avec des lames d'air confinée et ouverte. Les résultats des optimisations précédentes des cellules 1 et 4 qui pouvaient l'être ont été réutilisés pour améliorer la description des cellules 2 et 3. En effet, certains paramètres optimisés lors des étapes précédentes peuvent être réutilisés, dans la mesure où ils sont représentatifs des mêmes propriétés physiques d'une cellule à l'autre. Par exemple, les propriétés radiatives de la tôle des toitures des cellules ISOTEST sont les mêmes pour toutes les cellules. Ce dernier exemple n'est vrai que dans le cas où les tôles sont identiques et ont été soumises aux mêmes conditions environnementales.

Dernièrement, un bâtiment à échelle 1 a été modélisé et les résultats de la modélisation ont été analysés du point de vue du confort thermique des occupants du bâtiment et les possibilités qu'offrent le nouveau modèle pour la conception de bâtiment BIPV plus efficaces sont présentées.

IV.A.1 Analyse de sensibilité paramétrique

L'analyse de sensibilité de modèle est un outil permettant d'évaluer l'influence que peut avoir la modification d'une ou plusieurs entrées du modèle sur sa sortie. Ainsi, il est possible de déterminer quels sont les paramètres les plus influents du modèle sur une sortie considérée. Par exemple, l'effet que peut avoir la modification du coefficient d'échange convectif sur les températures de paroi et de fluide entre lesquels il y a échange de chaleur. L'outil utilisé dans cette thèse est issu d'un travail effectué auparavant sur le code de calcul ISOLAB [Mara, 2000]. Il est intégré au code de calcul, et permet de pratiquer l'analyse sur tous les paramètres régissant le modèle thermique de bâtiment [Miranville, 2002]. Il a été adapté pour prendre en compte les paramètres supplémentaires issus du modèle de panneau photovoltaïque.

Le principe général de l'analyse de sensibilité consiste à faire varier les entrées du modèle étudié et observer l'influence de chaque variation sur la sortie (Figure IV.1 p.111). Cette méthode est dérivée de la méthode FAST (Fast Fourier Amplitude Transform) et utilise un échantillonnage sinusoïdal des facteurs autour de leur valeur de base, chaque facteur ayant sa propre fréquence, la variation étant appliquée d'une simulation sur l'autre comme l'illustre la Figure IV.1 p.111.

A chaque paramètre est donc affectée une fréquence, et l'analyse de sensibilité est lancée. Chaque paramètre varie alors en fonction de la fréquence qui lui a été attribuée. Ainsi, un ensemble de jeux de paramètres le plus large possible est balayé. Les influences des différentes fréquences sont ensuite représentées à l'aide du spectre de Fourier sur un graphique (Figure IV.2). Ce spectre permet une première identification visuelle des paramètres les plus influents. Cette première identification faite, les effets principaux et secondaires (Figure IV.3 p.113) de ces fréquences (paramètres) sont tracés sur un autre graphique. L'effet principal représente l'influence directe d'un paramètre sur la sortie du modèle, alors

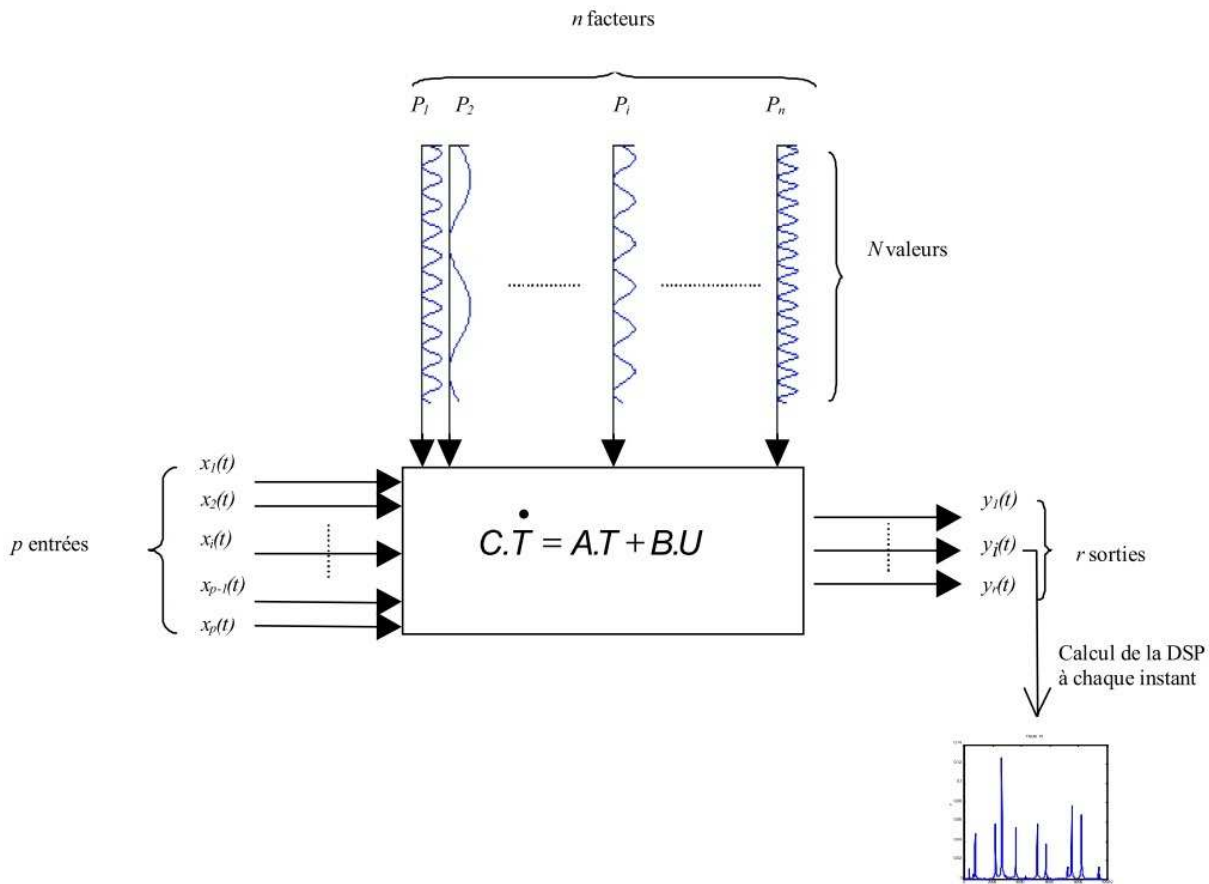


FIGURE IV.1 : Principe de la méthode d'analyse de sensibilité.

que l'effet secondaire représente l'influence des interactions d'un paramètre avec d'autres paramètres sur la sortie. Enfin, en fonction de l'effet que sa variation engendre sur la sortie, un paramètre pourra être considéré comme suffisamment influent ou pas. Pour toutes les analyses de sensibilité, la variation choisie est de 10% sur chacun des paramètres décrivant le modèle. Cette variation suffit dans la plupart des cas à mettre en évidence les paramètres influents. Cependant, dans certains cas, cette variation n'est pas suffisante, une valeur plus importante peut alors être affectée. Les cas où cette variation est trop faible correspondent à des cas où la valeur initiale d'un paramètre est faible, ce qui entraîne une variation elle-même très faible ; dans ce cas l'effet engendré sur la sortie n'est pas visible.

En prenant le spectre de Fourier de la Figure IV.2 en exemple, un certain nombre de paramètres influents peuvent être identifiés. Cependant, ils ne sont pas tous forcément intéressants pour notre étude. Par exemple, certains de ces paramètres correspondent aux orientations, inclinaisons ou surfaces des parois, ou encore à certaines propriétés des couches qui les composent (conductivité thermique, masse volumique, épaisseur). Tous ces paramètres sont bien connus soit par les données constructeurs, soit par la mesure in-situ. Il n'y a donc pas de place au doute quant à leurs valeurs justesses, même s'il est évident que pour certains d'entre eux ils sont très influents comme l'azimut de la paroi par exemple. [Miranville, 2002] discute justement de la présence de ce genre de paramètre dans l'analyse de sensibilité. Il conclut qu'en effet l'azimut de la paroi est important dans la détermination de sa température, de part son influence directe sur le coefficient d'échange convectif. Malgré cela, ce n'est pas un paramètre modifiable dans une séquence d'optimisation par la suite. C'est pour cette raison que ce type de paramètre ne sera pas conservé lors des analyses de sensibilité suivantes.

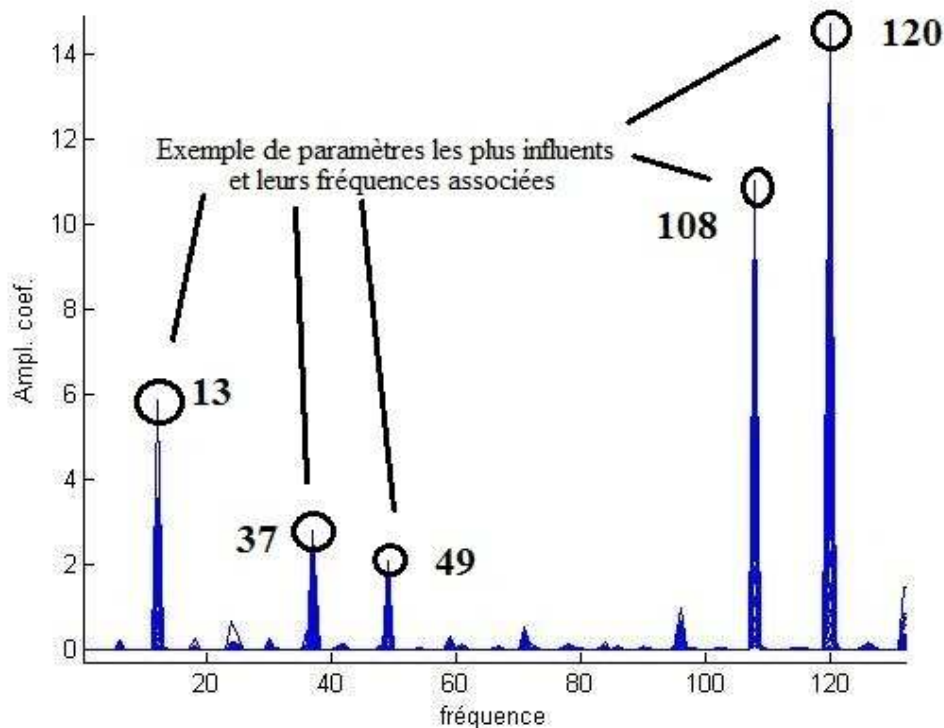


FIGURE IV.2 : Exemple de spectre de Fourier obtenu après une analyse de sensibilité.

Il reste alors le jeu de paramètres présenté sur la Figure IV.3 113 :

- 108 : le coefficient d'échange convectif entre le toit et l'air extérieur ;
- 120 : le coefficient d'absorption extérieur de la toiture.

Les valeurs des effets principaux ou secondaires donnent une idée des possibilités d'optimisation. En effet, un paramètre très influent, s'il fait partie des paramètres « optimisables », pourra permettre d'atteindre les conditions de validation. Aussi, si les besoins d'optimisation dépassent les possibilités des paramètres à corriger, l'optimisation sera d'autant plus difficile à réaliser, voire impossible.

Les coefficients d'échange convectifs apparaissent souvent dans ce type d'analyse de sensibilité, car ils proviennent de modèles empiriques qui ne décrivent pas parfaitement les phénomènes convectifs mis en jeu. De plus, dans le cas présenté ici, la valeur du coefficient visé est une moyenne du coefficient d'échange calculé par le modèle empirique au cours de la journée. Les coefficients d'absorption extérieurs apparaissent eux aussi souvent dans ce type d'analyse, parce qu'ils représentent directement la quantité d'énergie solaire que le bâtiment est capable d'absorber. Ici, le coefficient d'absorption extérieur de la toiture est celui de la paroi la plus exposée au rayonnement solaire et donc bien la principale possibilité du bâtiment d'absorber ce rayonnement. Le coefficient d'émission extérieur quant à lui représente la quantité d'énergie radiative perdue par la toiture avec son environnement.

Dans cette thèse, lorsque la comparaison modèle/mesure n'aura pas été fructueuse, l'analyse de sensibilité paramétrique a permis d'identifier le jeu de paramètres les plus influents sur la sortie modélisée. Après avoir éliminé les paramètres incohérents ou connus de manière certaine (orientation du bâtiment, surfaces des parois, inclinaisons, etc.), l'optimisation du modèle s'est focalisée sur les paramètres identifiés restants, surtout si ceux-ci correspondaient aux paramètres optiques mal-connus du modèle de panneau PV. En effet, une méconnaissance de certains paramètres engendre fatalement une erreur de

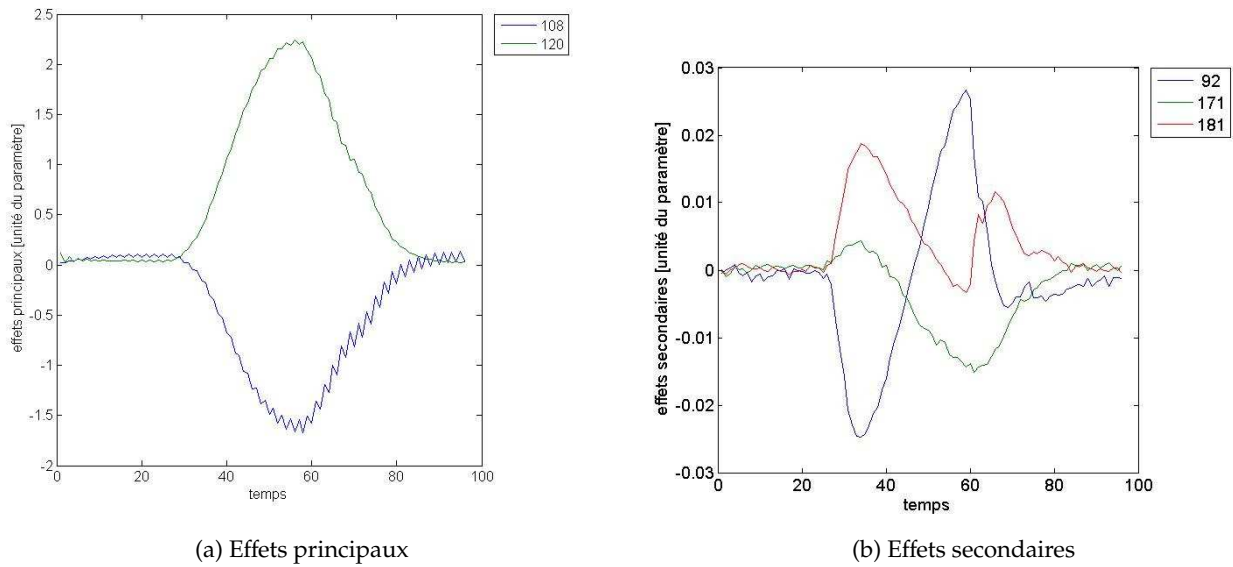


FIGURE IV.3 : Exemple des effets principaux et secondaires obtenus après analyse du spectre de Fourier.

modélisation du système. L'analyse de sensibilité, en identifiant les paramètres les plus influents sur la sortie du modèle, peut aussi mettre en évidence les paramètres mal-connus.

IV.A.2 Optimisation des paramètres du modèle

Pour optimiser le modèle de bâtiment équipé de panneaux PV, le choix a été fait d'utiliser un logiciel d'optimisation reconnu : GenOpt [Wetter, 2009]. GenOpt est un logiciel d'optimisation générique et peut être utilisé rapidement et simplement pour optimiser des modèles. L'optimisation du modèle est faite en minimisant une fonction de coût (une ou plusieurs sorties du modèle).

GenOpt a semblé être un bon choix de part son adaptabilité et la variété d'algorithmes d'optimisation qu'il contient. De plus, il est parfaitement adapté à la minimisation de fonctions de coûts issues de codes de simulation thermique du bâtiment tel qu'ISOLAB, qui ne peuvent qu'approcher numériquement la solution exacte.

La plus grande difficulté rencontrée dans les problèmes d'optimisation de modèles de bâtiments vient du nombre important de paramètres décrivant le modèle. Ceci engendre souvent plusieurs minimum locaux dans la fonction de coût. Le risque est alors que l'optimisation aboutisse justement sur l'un de ces minimums locaux et non sur le minimum global de la fonction de coût, voir qu'elle n'aboutisse pas. Pour éviter ce genre de problème, il est recommandé de n'utiliser que les algorithmes suivants :

- « GPS Hooke-Jeeves algorithm » avec de multiples points de départ ;
- « Hybrid algorithm » ;
- « Particle Swarm Optimization algorithm ».

Ces algorithmes assurent de trouver un minimum à la fonction de coût, et minimisent le risque de tomber sur un minimum local. Dans cette thèse, seul l'algorithme « GPS Hooke-Jeeves » sera utilisé, car il est le plus adapté à l'optimisation de codes de simulation thermique du bâtiment.

Pour plus de détails sur les différents algorithmes, il est possible de se référer aux travaux de [Wetter, 2009].

Pour pouvoir lancer des séquences d'optimisation à l'aide de GenOpt, une fenêtre a été ajoutée à ISOLAB permettant de fournir les différentes informations nécessaires (cf Figure IV.4) :

- Le type d'algorithme choisi ;
- Le fichier bâtiment visé par l'optimisation (modèle à optimiser) ;
- Le fichier météo utilisé ;
- Le(s) paramètre(s) à optimiser dans le fichier bâtiment (entrée(s) du modèle) ;
- La (ou les) température(s) à évaluer (sortie(s) du modèle ou fonction de coût).

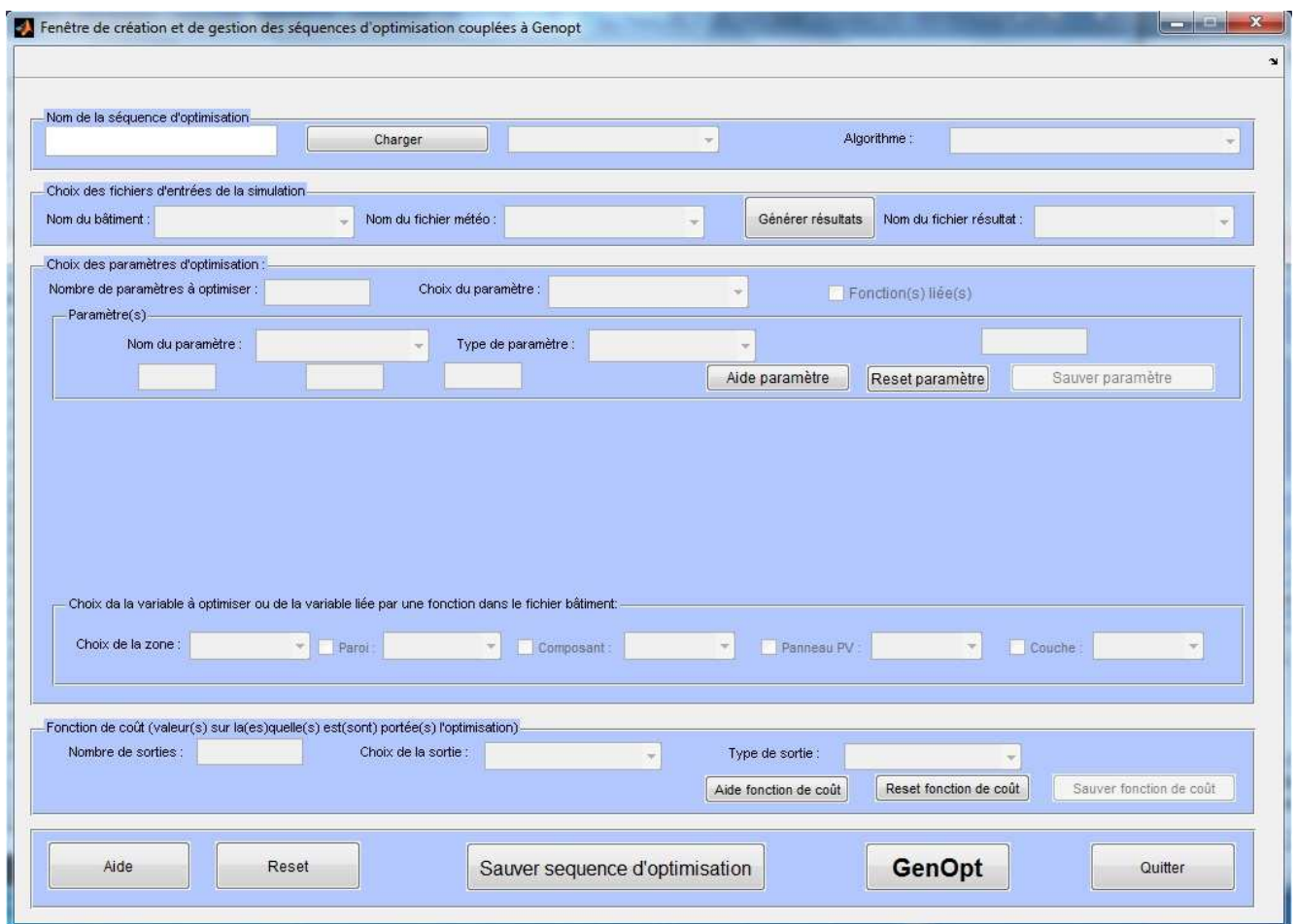


FIGURE IV.4 : Fenêtre d'ISOLAB gérant les séquences d'optimisation.

Ces informations sont compilées dans plusieurs fichiers par la fenêtre et stockées dans un dossier du répertoire de GenOpt dans différents fichiers textes. Elles forment l'ensemble des fichiers nécessaires au lancement d'une séquence d'optimisation sous GenOpt [Wetter, 2009] :

- Une version auto-exécutable d'ISOLAB (*.exe) ;
- Le fichier bâtiment (*.btm) ;
- Le fichier météorologique (*.dat) ;
- Le fichier de configuration (*.cfg) ;
- Le fichier d'initialisation (*.ini) ;

– Le fichier de commande ("*_command.txt").

Remarque : Il est important de noter que le couplage de GenOpt avec un logiciel de calcul ne peut se faire que si les entrées et sorties de celui-ci sont stockées dans des fichiers textes. Les fichiers bâtiments ("*.btm"), météorologiques ("*.dat") et résultats ("*.txt") de la version auto-exécutable d'ISOLAB le sont.

La version auto-exécutable d'ISOLAB ("*.exe") est nécessaire pour que GenOpt puisse le lancer. En effet, la version traditionnelle nécessite l'ouverture de plusieurs fenêtres et l'entrée de données par l'utilisateur pour fonctionner, ce qui est inutile dans une procédure d'optimisation.

Le fichier bâtiment ("*.btm") contient des informations supplémentaires par rapport au fichier bâtiment de base, dédiées au couplage d'ISOLAB à GenOpt. En plus de la description du bâtiment, il spécifie l'évaluation de la fonction de coût et contient une identification des paramètres à optimiser. Ces derniers sont marqués afin que GenOpt puisse les identifier. Le marqueur est contenu entre deux signes « % » et est situé à la place de la valeur du paramètre à optimiser. Ainsi, GenOpt peut remplacer ce marqueur par les différentes valeurs prises par le paramètre au cours de l'optimisation.

Le fichier météorologique ("*.dat") est nécessaire au lancement d'une simulation, mais n'est pas affecté par l'optimisation.

Le fichier d'initialisation ("*.ini") donne à GenOpt l'emplacement des fichiers bâtiment et météorologique et le nom de l'auto-exécutable. Il précise également où trouver le fichier contenant la fonction de coût et comment lire sa valeur. Il donne également l'emplacement du fichier de configuration, fichier regroupant les informations nécessaires au lancement d'ISOLAB.

Le fichier de commande ("*_command.txt") quant à lui contient une description des paramètres (noms, valeurs initiales, minimales et maximales, pas d'évolution et types), les descriptions de l'algorithme à utiliser et la description de l'optimisation elle-même. La description des paramètres doit être donnée de manière à respecter les lois de la physique et correspondre à une plage de valeurs probables ou acceptables du paramètre à optimiser. Les descriptions de l'algorithme choisi et de l'optimisation sont établies automatiquement par la fenêtre de couplage selon les recommandations du manuel d'utilisation de GenOpt [Wetter, 2009].

En ce qui concerne la fonction de coût, GenOpt cherchera le meilleur jeu de paramètres pour la minimiser. Dans ce travail de thèse, le but de l'optimisation est de minimiser l'écart entre des températures simulées et mesurées. Or cet écart évolue au cours du temps et utiliser cette ensemble de valeurs comme fonction de coût n'est pas directement possible. Il faut donc trouver un outil capable de représenter correctement l'ensemble des écarts d'une simulation en une seule valeur. C'est pourquoi l'écart-type a été l'outil choisi (IV.1).

Dans les cas rencontrés au cours de cette thèse, les valeurs à étudier sont des écarts entre résultats de simulation et mesures. L'écart-type ne peut donc être utilisé directement, car il ne peut en théorie n'être appliqué qu'à un jeu de valeurs mesurées ou à un jeu de valeurs calculées. Le choix s'est donc porté sur l'utilisation d'un écart-type modifié pour pouvoir traiter le problème d'optimisation expérimentale du modèle (IV.1).

L'écart-type modifié représente donc la fonction de coût pour une sortie considérée. Dans le cas où plusieurs sorties sont utilisées pour optimiser le modèle, la fonction de coût globale utilisée par GenOpt correspond à la somme des valeurs absolues des fonctions de coût de chaque sortie.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2} \tag{IV.1}$$

Remarque : Dans les cas où le but ne sera pas d’optimiser un écart entre prédictions et mesures (minimiser le flux traversant une paroi par exemple), la fonction de coût correspond à la somme des valeurs prises par la sortie aux différents pas de temps.

La Figure IV.5 présente à titre informatif les informations intéressantes à lire lorsqu’une séquence d’optimisation est en cours de traitement. On y distingue la courbe d’évolution de la fonction de coût en fonction de la valeur d’un paramètre. L’exemple d’un seul paramètre à optimiser a été choisi pour faciliter la lecture du graphique. L’exemple concerne un cas traité dans cette thèse : le but a été d’optimiser le coefficient de transmission du verre de la face avant du panneau PV pour que la sortie du modèle radiatif de cette thèse prédise correctement le productible PV. Le paramètre 1 de la figure correspond au coefficient de transmission et la fonction de coût correspond à la différence entre le productible PV trouvé par le modèle de cette thèse et celui trouvé par le modèle dit « simple diode ».

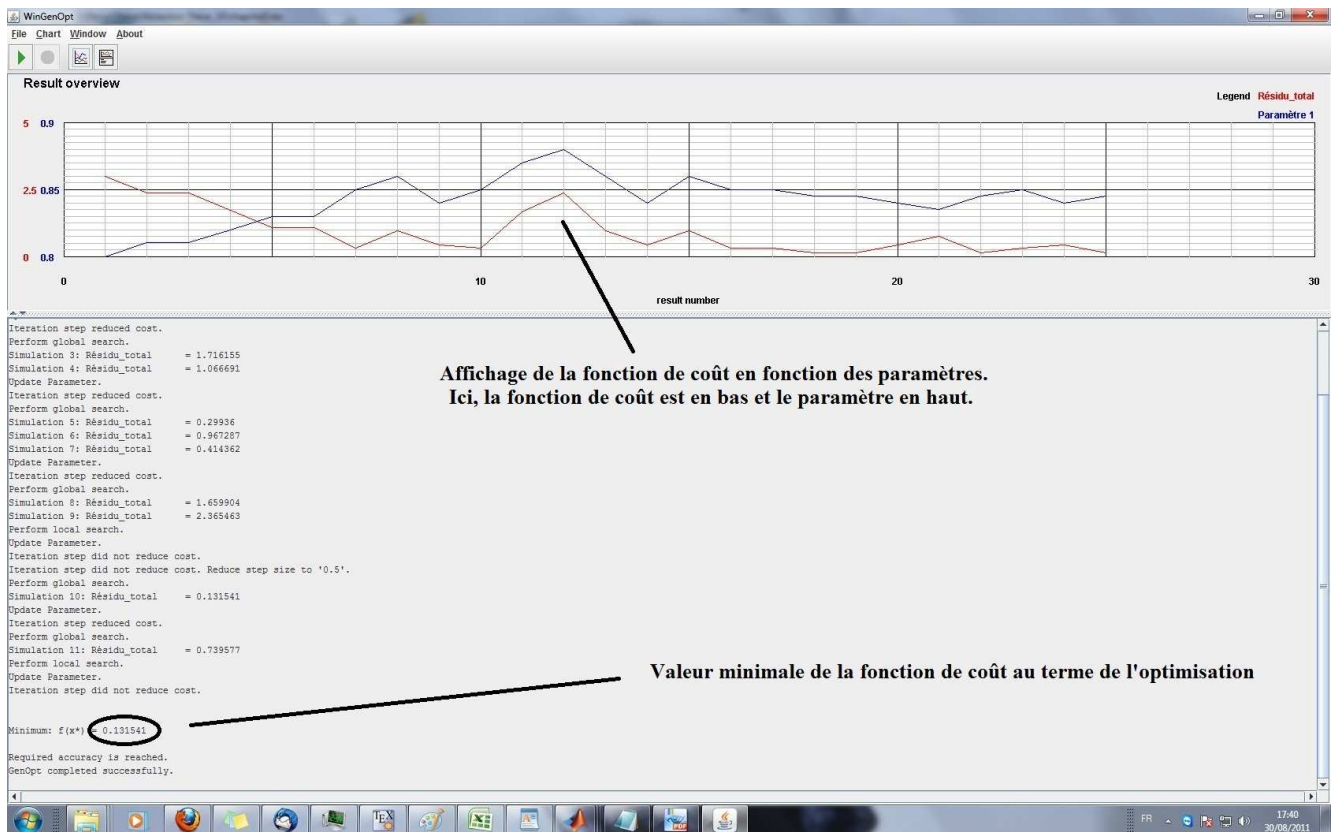


FIGURE IV.5 : Vue d’une séquence d’optimisation achevée sous l’environnement GenOpt.

IV.B PRÉSENTATION DES CAS D’ÉTUDES

Dans cette partie, les différentes études décrivant les applications de la méthode de validation aux différentes cellules ISOTEST seront présentées. Afin de ne prendre en compte que les erreurs issues du

modèle de panneau photovoltaïque lors de validation de celui-ci, il faut au préalable vérifier que le modèle de bâtiment seul est correctement modélisé. C'est à cette condition que la méthode de validation pourra être appliquée au bâtiment BIPV. En effet, si des doutes persistent quand à la justesse du modèle de bâtiment seul, aucune étude ne pourra être concluante sur la modélisation du même bâtiment équipé de panneaux PV, étant donné que sa complexité est accrue. Et si la validation aboutit dans de telles conditions, elle ne serait que fortuite.

Chaque étude a donc eu pour objectif de vérifier et optimiser le modèle de bâtiment associé : le bâtiment seul et le bâtiment équipé de panneaux PV en toiture. Chacune d'elles sera basée sur un même processus et s'appuiera sur les résultats de l'étude précédente dans le but d'améliorer le modèle de bâtiment BIPV.

IV.B.1 Présentation de l'étude 1 : le bâtiment sans installation PV

La première étude a permis de valider le modèle de bâtiment sans installation PV. Pour ce faire, l'étude s'est appuyée sur la modélisation de la cellule 1. En se référant à la Figure III.20 p.106 du Chapitre III, cette cellule se caractérise par son type de complexe de toiture : Le complexe de toiture est celui de la cellule de référence, c'est à dire qu'il ne contient aucun système de protection solaire. Il se compose alors d'un plafond de placoplâtre de 8mm d'épaisseur surmonté d'une lame d'air de 16mm et de la tôle en acier galvanisé d'1mm.

Le complexe de toiture de cette cellule est constituée comme suit de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment : plafond de placoplâtre de 8mm d'épaisseur / lame d'air confinée de 16mm / tôle en acier galvanisé d'1mm.

La modélisation de ces cellules ne nécessite pas l'emploi du modèle de panneau PV. L'objectif de l'étude sera donc de vérifier dans un premier temps le bon fonctionnement du code de simulation ISOLAB et dans un second temps si la méthode de validation proposée est fiable. En effet, si une erreur de modélisation est mise à jour la méthode de validation présentée plus tôt dans cette thèse sera appliquée à la modélisation défectueuse.

A priori, si le modèle de bâtiment est validé, les paramètres qui ont été optimisés pour la cellule associée et qui décrivent les mêmes propriétés physique dans une autre cellule, pourront être réutilisés pour la modélisation de cette dernière. Si les résultats de simulation issus de cette « re-modélisation » permettent de valider le modèle de la seconde cellule, la méthode de validation pourra être considérée comme fiable, sinon, une nouvelle modélisation du bâtiment sera nécessaire. De plus, une validation réussie signifiera que le modèle de bâtiment pourra être utilisé dans la seconde étude.

L'étude 1 va donc se présenter comme suit :

1. **Confrontation des résultats de simulation aux mesures pour la cellule 1 ;**
2. **Analyse de sensibilité** des paramètres de la cellule 1 ;
3. **Optimisation des paramètres de la cellule 1 mis en cause lors de l'analyse de sensibilité ;**
4. **Confrontation du modèle optimisé de la cellule 1 aux mesures ;**
5. **Corroboration des résultats.**

IV.B.2 Présentation de l'étude 2 : le bâtiment BIPV

La seconde étude a pour objectif de valider le modèle de bâtiment équipé d'une installation PV intégrée ou semi-intégrée. Pour ce faire, l'étude s'est appuyée sur la modélisation des cellules 2 et 3. En se référant à la Figure III.18 p.104 du Chapitre III, ces cellules peuvent se caractériser par leur types de complexes de toiture photovoltaïque différents :

- **Cellule 2** : Le complexe de toiture PV est celui de la cellule où la lame d'air située sous le panneau PV est confinée.
- **Cellule 3** : Le complexe de toiture PV est de la cellule où la lame d'air située sous le panneau PV est ouverte aux extrémités.

Les complexes de toiture PV de ces cellules sont constituées comme suit de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment :

- **Cellule 2** : plafond de placoplâtre de 8mm d'épaisseur / lame d'air confinée de 16mm / tôle en acier galvanisé d'1mm / lame d'air **confinée** de 4cm / panneau photovoltaïque ;
- **Cellule 3** : plafond de placoplâtre de 8mm d'épaisseur / lame d'air confinée de 16mm / tôle en acier galvanisé d'1mm / lame d'air **ouverte** de 4cm / panneau photovoltaïque.

La modélisation de ces cellules nécessite l'emploi du modèle de panneau PV. L'objectif de l'étude sera donc de valider le modèle de panneau photovoltaïque semi-intégré au bâtiment pour les deux cas de lame d'air sous panneau PV qui peuvent être rencontrées sur ce type d'installation.

Si la première étude aboutit à une validation du modèle de bâtiment et de la méthode, cela veut dire que la reproductibilité des paramètres est possible. En appliquant cette hypothèse à la deuxième étude, les paramètres optimisés d'un deux modèles de bâtiments pourront être réutiliser pour simplifier l'optimisation du second, dans la mesure où ces paramètres représentent les mêmes propriétés physiques.

L'étude 2 va alors se présenter comme suit :

1. **Confrontation des résultats de simulation aux mesures pour les cellules 2 et 3 ;**
2. **Analyse de sensibilité** des paramètres des cellules 2 et 3 ;
3. **Optimisation** des paramètres de la cellule 2 mis en cause lors de l'analyse de sensibilité ;
4. **Confrontation du modèle optimisé de la cellule 2 aux mesures ;**
5. **Report des résultats de l'optimisation de la cellule 2 au modèle de la cellule 3** et confrontation de ce dernier aux mesures ;
6. **Corroboration des résultats.**

La suite de ce chapitre présentera donc ces deux études et leurs résultats, et se terminera par une étude de cas appliquée à une autre cellule de la plate-forme expérimentale, la LGI. Cette application donnera un aperçu des nouvelles possibilités du code de calcul *ISOLAB*.

IV.C ETUDE 1 : APPLICATION DE LA MÉTHODE DE VALIDATION À LA CELLULE ISOTEST 1

IV.C.1 Confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 1

La comparaison des résultats de simulation du modèle aux mesures permet de constater graphiquement de manière simple et rapide si le modèle prédit correctement l'évolution des différentes températures des composants du bâtiment.

Remarque : Tous les graphiques présentés par la suite ont été tracés sur les trois premiers jours de la période du 27 Janvier au 2 Février 2009, pour faciliter leurs lectures et interprétations, voir seulement le premier jour pour tous les tracés liés aux analyses de sensibilité. Cette période a été choisie à cause de la variabilité des vitesses de vent sur la période (cf Figure IV.6).

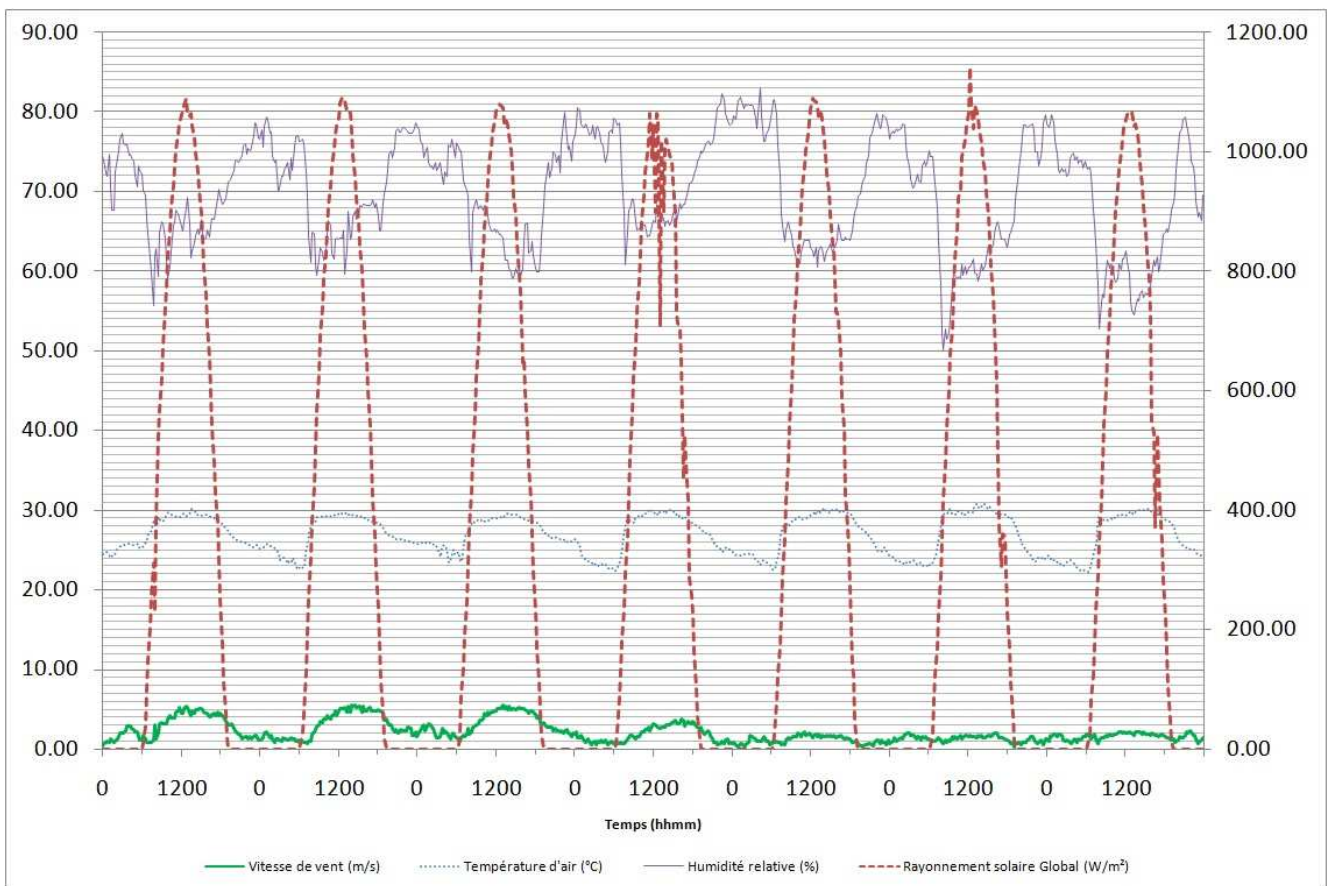


FIGURE IV.6 : Vitesse du vent et rayonnement solaire diffus sur la période du 27 Janvier au 2 Février 2009.

Cette étude comparative se fait en simulant l'évolution de la température des composants du module ISOTEST sur la période à laquelle le modèle de panneau photovoltaïque doit être validé. Pour cela, il suffit de comparer les valeurs des températures en différents points avec les résultats de simulation correspondant. Le mois choisi pour l'étude est le mois de Janvier 2009. Les particularités de ce mois sont que le rayonnement solaire maximum journalier était assez stable tout au long du mois (environ

1000 W.m⁻²) et que les conditions climatiques sont représentatives de la période estivale. C'est à ce moment que la nécessité de protection solaire est plus importante, et là où les conditions de confort sont généralement plus difficile à atteindre pour les climats tropicaux et humides.

Si cette vérification n'est pas concluante, il faudra également faire passer à la cellule 1 les étapes d'optimisation pour valider son modèle et être en mesure de l'utiliser comme référence pour l'optimisation des cellules 2 et 3. En effet, le modèle courant d'ISOLAB (celui décrivant l'ISOTEST de référence) sera utilisé pour les décrire en partie et le modèle de panneau photovoltaïque se « greffera » sur le modèle de bâtiment. Si le modèle de bâtiment utilisé comme base de travail n'est pas valide, il sera plus difficile de valider le modèle de panneau PV, car il sera difficile de savoir si les erreurs viennent du modèle de bâtiment ou de celui du panneau PV.

Rappel : L'ISOTEST 1 est la cellule de référence sur laquelle aucun panneau n'a été installé, et qui ne comporte pas d'isolant au sein de sa toiture (cf Figure III.20 p.106 du Chapitre III).

Remarque : Vu le nombre important de nœuds de températures issus des différentes simulations, il a été décidé de ne présenter par la suite que les résultats les plus intéressants pour cette étude, afin de ne pas avoir trop d'informations et pouvoir rendre une analyse la plus claire possible.

La confrontation des résultats de simulation du modèle aux mesures prises lors de l'expérimentation a été faite pour toutes les parties du bâtiment sur lesquelles des mesures ont pu être prises, c'est-à-dire les températures de parois intérieures et les températures d'air des différentes zones du bâtiment. Dans le cas de l'ISOTEST 1, les températures étudiées ont été les suivantes :

- La température de surface intérieure de la paroi nord ;
- La température de surface intérieure de la paroi sud ;
- La température de surface intérieure de la paroi ouest ;
- La température sèche d'air de l'enceinte ;
- La température de surface inférieure du plafond ;
- La température d'air de la lame d'air entre la tôle et le plafond (plus tard appelée lame d'air sous toiture) ;
- La température de surface intérieure de la tôle de toiture.

Remarque : Les résultats de la paroi ouest ne sont pas exploités car celle-ci sert de porte aux cellules ISOTEST, aucune prise de mesures n'y est faite. Quant au sol, selon les modèles de bâtiment, la modélisation est plus ou moins réussie. Afin de s'affranchir des erreurs que peuvent commettre les modèles de sol, le choix a été fait d'assimiler cette température à la valeur mesurée lors de l'expérimentation. Cette valeur est stockée dans le fichier météorologique, et utilisée par ISOLAB comme valeur de référence pour l'assimilation de données expérimentales.

Sur les Figure IV.7, Figure IV.8 et Figure IV.9, au niveau de la dynamique d'évolution des températures, le modèle prédit correctement le comportement thermique global du bâtiment. Sur la période du mois de janvier, les écarts maximum et les écarts-types modèle/mesures sont donnés dans le Tableau IV.1.

Au cours du mois de Janvier 2009, les écarts modèle/mesures des différentes parties du bâtiment varient quotidiennement. Une partie de ces écarts peuvent s'expliquer de trois manières :

1. Le changement de l'environnement immédiat, qui va interagir avec le bâtiment (croissance ou coupe de la végétation) ;

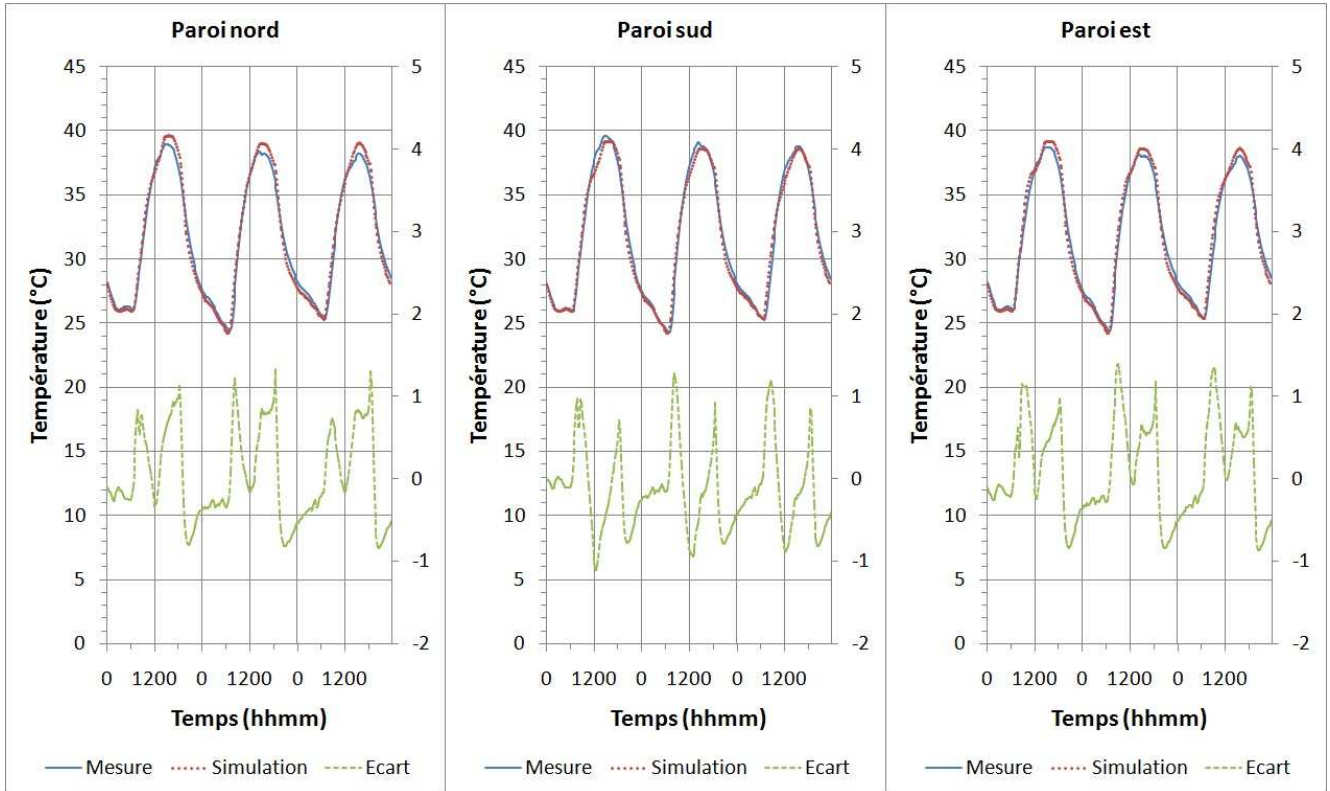


FIGURE IV.7 : Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour les températures de surface intérieure des parois verticales de l'ISOTEST 1 avant optimisation.

Emplacement de la mesure	Ecart-type σ (°C)	Ecart maximum (°C)
Paroi nord	0,74	1,99
Paroi sud	0,64	1,28
Paroi est	0,81	1,98
Air de l'enceinte	0,55	2,27
Plafond	1,40	2,14
Lame d'air sous tôle	6,29	20,46
Tôle	3,62	14,69

Tableau IV.1 : Écarts-types et écarts maximum de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 1

2. Des évènements météorologiques localisés que l'éloignement de la station météorologique par rapport aux expérimentations ne permet pas de prendre en compte ;
3. Des erreurs de mesures localisées et/ou intempestives des appareils de mesures.

Il est difficile de prendre en compte ces évènements lors des séquences de mesures de par leur caractère aléatoire. Mais il faut garder en mémoire qu'ils pourront jouer un rôle plus ou moins important pendant la phase de validation expérimentale. En effet, ils peuvent induire une mauvaise interprétation des résultats, en laissant croire qu'un modèle est validé mais aussi l'inverse. Par exemple, une mesure, même si elle est juste là où la station de mesure météorologique se trouve, peut ne pas représenter la valeur qui est effectivement sur l'expérimentation à quelques mètres de là.

Il faut aussi citer les erreurs particulières liées au fonctionnement et au suivi des appareils de mesures.

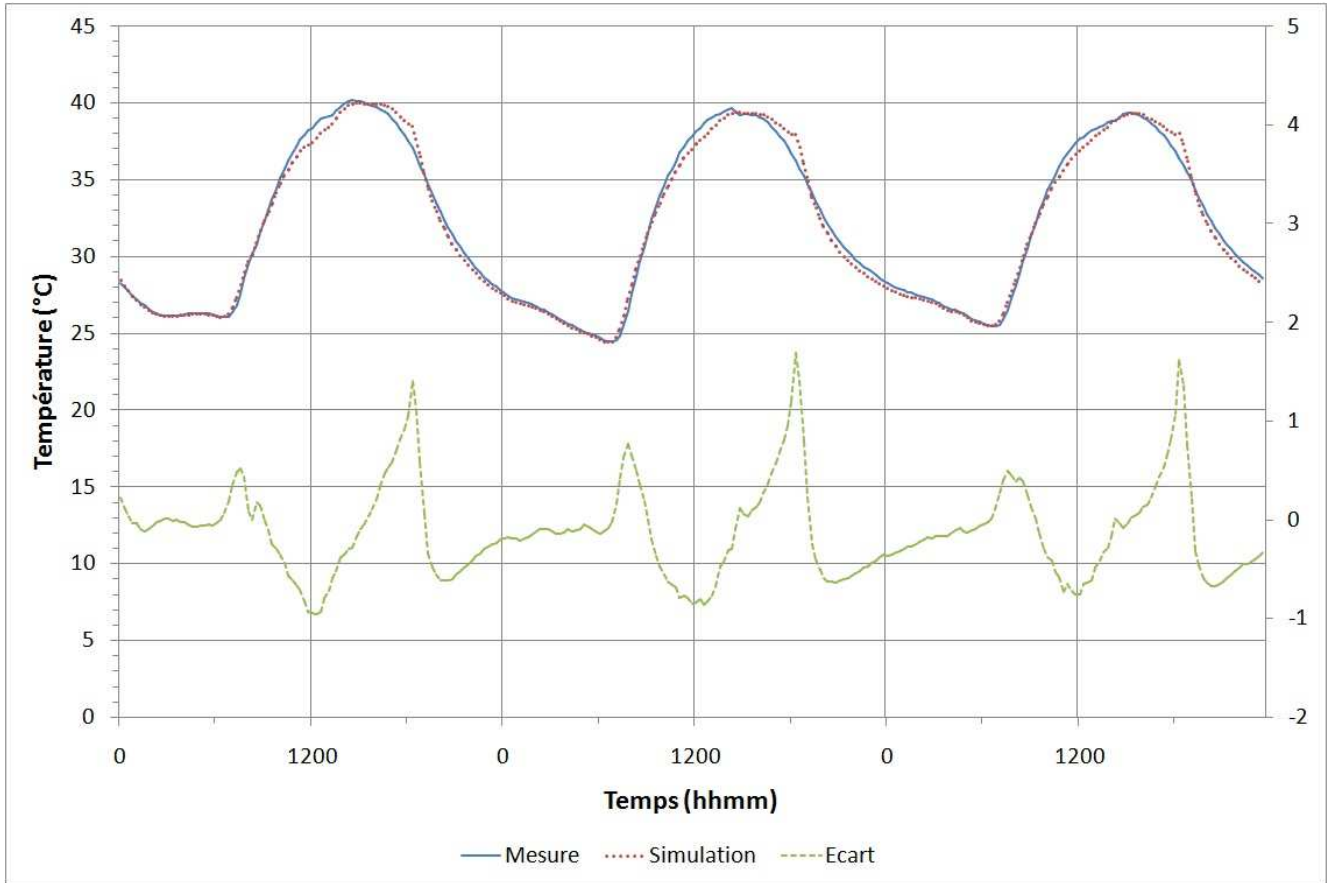


FIGURE IV.8 : Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour la température d'air de l'enceinte de l'ISOTEST 1 avant optimisation.

Par exemple, la mesure de l'ensoleillement diffus se fait grâce à un pyranomètre habituellement utilisé pour mesurer l'ensoleillement global. Pour que cet appareil soit capable de mesurer l'ensoleillement diffus, un anneau occultant le rayonnement solaire direct tout au long de sa course lui est installé. Cependant, la hauteur du soleil (et donc sa course) va varier au cours de l'année selon la période de l'année, alors que l'anneau est fixe. Pour remédier à ce problème, l'anneau doit être déplacé manuellement afin de toujours bloquer le rayonnement direct incident sur le pyranomètre. Si ce suivi n'est pas fait régulièrement, les données mesurées peuvent être inexploitable.

Selon l'hypothèse de validation, les écarts maximums présentés plus hauts ne doivent pas dépasser 10% de la plage de variation de la sortie étudiée. Pour faciliter la comparaison par rapport à cette plage de variation, ils peuvent être ramenés à des erreurs ϵ en utilisant l'équation (IV.2). Les erreurs associées aux écarts précédemment cités sont présentés dans le Tableau IV.2.

$$\epsilon = \frac{\text{Ecart}_{\max}}{\text{Etendue}} \quad (\text{IV.2})$$

Avec $\text{Etendue} = \text{Mesure}_{\max} - \text{Mesure}_{\min}$.

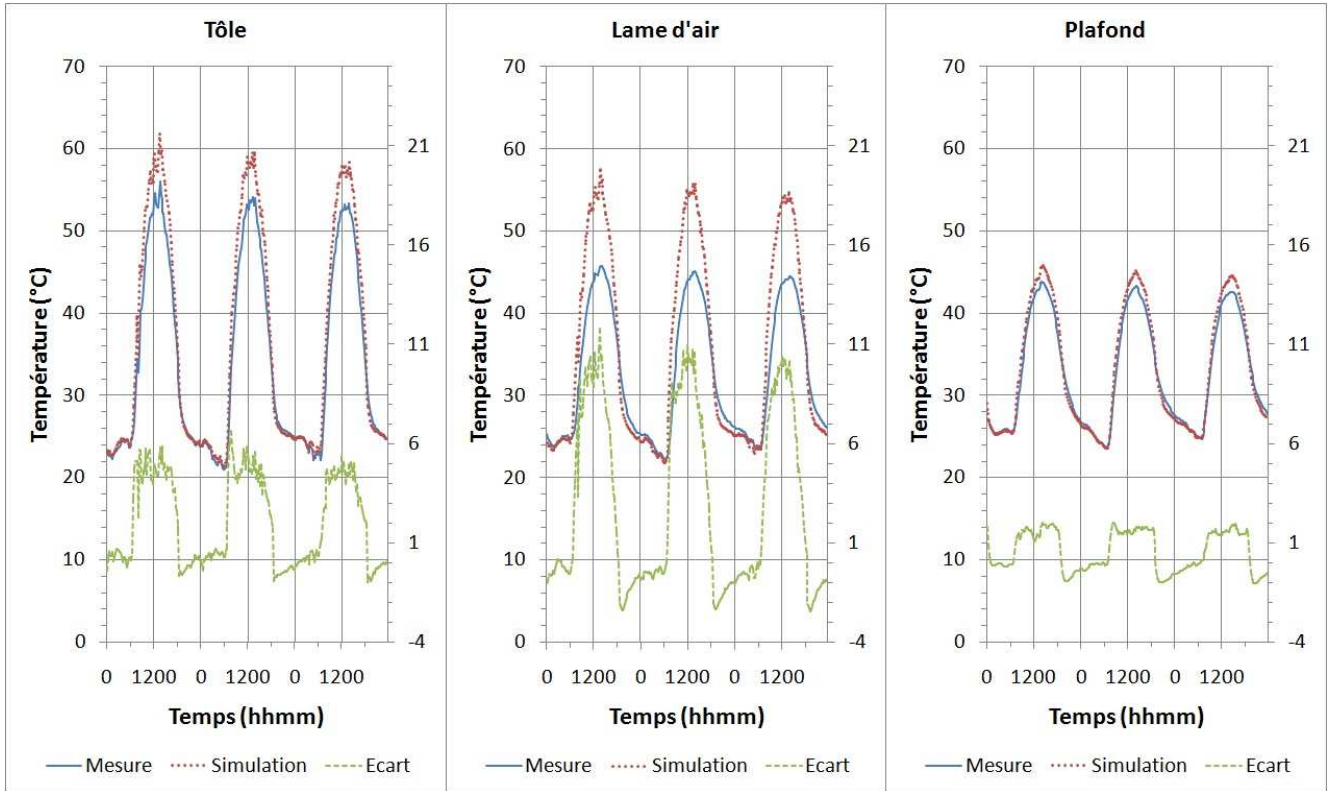


FIGURE IV.9 : Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour les températures des éléments de la toiture de l'ISOTEST 1 avant optimisation.

Au regard des écarts, des erreurs et de l'hypothèse de validation, il n'est pas possible de valider le modèle de bâtiment sur le cas de l'ISOTEST 1. Ce modèle de bâtiment a donc fait l'objet d'une séquence d'optimisation présentée par la suite.

De plus, en analysant les Tableau IV.1, Tableau IV.2 et la Figure IV.10, il est clair que la lame d'air de la toiture est la partie du bâtiment qui possède les plus forts écarts modèle/mesure, soit 20,46°C. Il est également aisé de penser que l'erreur de modélisation de cette partie du bâtiment se propage de proche en proche. En effet, celle-ci s'atténue pour la toiture et le plafond, leurs écarts modèle/mesure maximum sont respectivement de 14,69°C et de 2,14°C. Une meilleure modélisation de cette partie du bâtiment semble donc absolument nécessaire.

Emplacement de la mesure	Erreur ϵ (%)
Paroi nord	4,24
Paroi sud	2,77
Paroi est	4,28
Air de l'enceinte	4,79
Plafond	3,79
Lame d'air sous tôle	27,31
Tôle	21,71

Tableau IV.2 : Erreurs issues de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 1

Quant aux écarts observés au niveau de la modélisation des parois verticales et de l'air de l'enceinte, elles vérifient dans l'hypothèse de validation. Il est fort probable que les écarts observés sur les parois verticales ou sur l'air de l'enceinte soient une conséquence d'une mauvaise modélisation de la toiture et non de d'une erreur de modélisation des parois ou de l'air de l'enceinte. La suite de l'étude devra s'y intéresser et établir si l'un de ces modèles (de paroi ou d'air) doit être mis en cause.

Cette confrontation conduit donc à une optimisation du modèle de bâtiment simple. Pour ce faire, il est nécessaire tout d'abord de mener une analyse de sensibilité en s'intéressant aux différents éléments du bâtiment dont la température est mal modélisée. Nous nous concentrerons donc sur les éléments de la toiture, en particulier la température de la lame d'air puisque c'est elle qui présente les écarts modèles/mesures les plus importants.

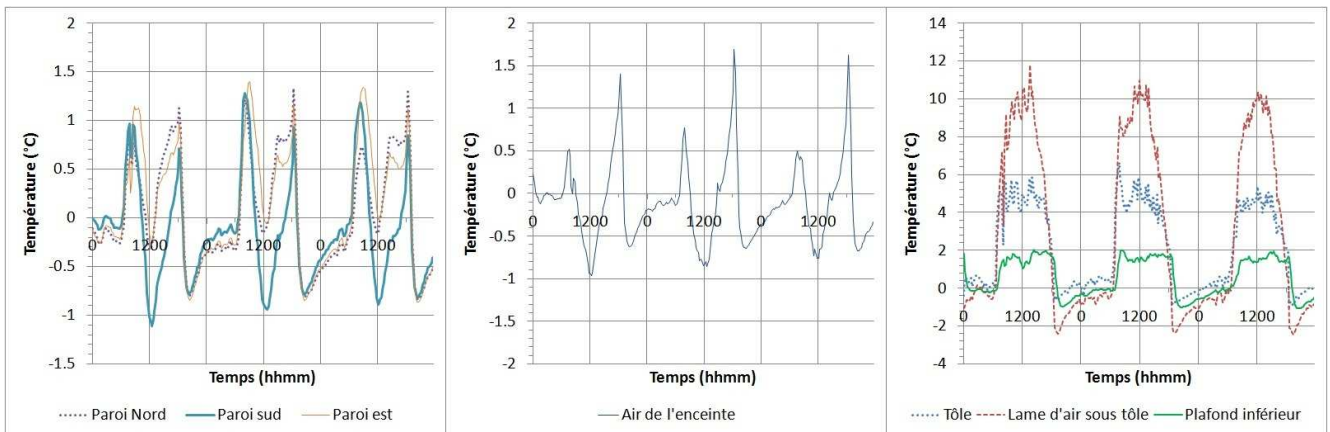


FIGURE IV.10 : Écarts modèle/mesure pour les différents éléments de l'ISOTEST 1 avant optimisation.

IV.C.2 Analyse de sensibilité de la cellule ISOTEST 1

Les trois étapes de l'analyse de sensibilité vont être appliquées au modèle de la cellule de référence (ISOTEST 1), et son jeu de paramètres les plus influents va être identifié après élimination des paramètres déjà connus (conductivité du matériau, azimuth de la paroi, etc.). Les résultats de l'analyse présentés ci-après ont été obtenus en se focalisant dans un premier temps sur les températures des éléments de la toiture, puis, dans un second temps, sur l'enceinte du bâtiment.

Remarque : L'analyse de sensibilité va consister à faire varier des paramètres autour de leurs valeurs de base. Ceci étant, les différents modèles de transfert de chaleur (conductif, convectif et radiatif) doivent pouvoir être décrit par l'intermédiaire d'un ou plusieurs paramètres. En ce qui concerne le modèle conductif, ceci peut se faire grâce aux conductivités, capacités ou masses volumiques des matériaux par exemple. Pour le modèle radiatif, les coefficients radiatifs (d'absorption, d'émission, etc.) sont utilisés. En revanche, pour le modèle convectif, le problème de la variabilité du coefficient d'échange convectif au cours du temps se pose. Pour prendre en compte les coefficients d'échanges convectifs dans l'analyse de sensibilité, il faut travailler sur des valeurs moyennes de ceux-ci sur le temps de simulation. Il faut alors moyenniser les valeurs obtenues au cours de la simulation pour chaque élément concerné et réinjecter cette valeur dans la description du bâtiment en changeant le modèle convectif de telle sorte qu'il modifie les équations en fonction d'une valeur de coefficient d'échange convectif moyen prédéfini. C'est ainsi que l'outil d'analyse de sensibilité pourra étudier l'effet du modèle convectif sur la sortie.

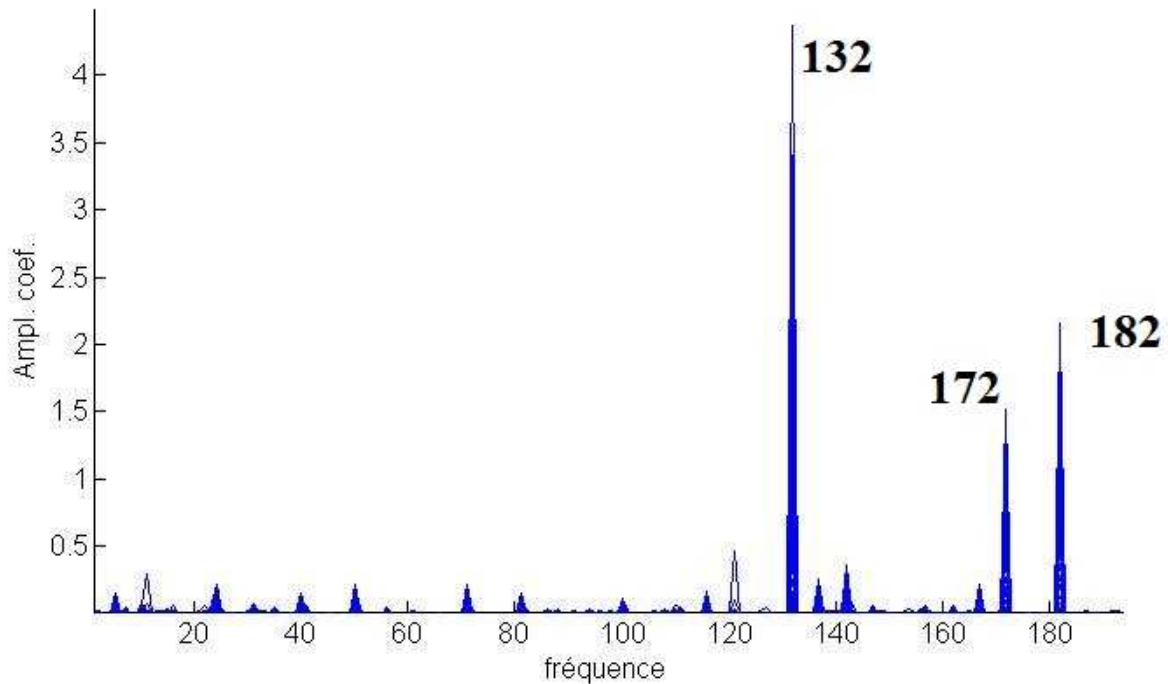


FIGURE IV.11 : Spectre de Fourier obtenu par rapport à la température de lame d'air sous tôle de l'ISOTEST 1.

La Figure IV.11 a été obtenue en procédant à une analyse de sensibilité des paramètres sur la température de la lame d'air prédite par le modèle. Les paramètres les plus influents sur cette température sont aisément identifiables. Il s'agit des paramètres portant les fréquences :

- 132 : Azimut du toit ;
- 172 : Coefficient d'échange convectif extérieur de la toiture ;
- 182 : Coefficient d'absorption extérieur de la toiture.

Remarque : Pour les raisons évoquées auparavant, l'azimut du toit ne sera pas retenu dans la suite de l'étude, car c'est un paramètre bien connu, de valeur fixe : 180° (qui correspond à une orientation vers le nord).

Il ne reste donc que le coefficient d'absorption extérieur de la toiture et son coefficient d'échange convectif extérieur. Ces deux paramètres sont en concordance avec les résultats obtenus lors des précédentes étapes, car ils représentent respectivement la capacité de la toiture à absorber de la chaleur, et sa capacité à en perdre. Ils pourraient facilement engendrer une erreur sur la modélisation de la toiture si ils étaient erronés.

La Figure IV.12 présente les effets des paramètres sur la température de la lame d'air de l'ISOTEST 1. Nous y lisons qu'une augmentation de 10% des coefficients d'échange convectif (h_{ce}) et d'absorption extérieurs (α_{ext}) engendrent respectivement une variation d'au maximum -17°C et $+4,5^\circ\text{C}$ sur la température de la lame d'air (cf Tableau IV.3). Les effets secondaires étant très petits devant les effets principaux, ils ont été négligés. Par la suite les effets secondaires ne seront commentés que s'ils ne sont pas négligeables. Vu l'importance des effets principaux précédemment cités sur la sortie du modèle, ils sont les paramètres idéaux pour une optimisation du modèle.

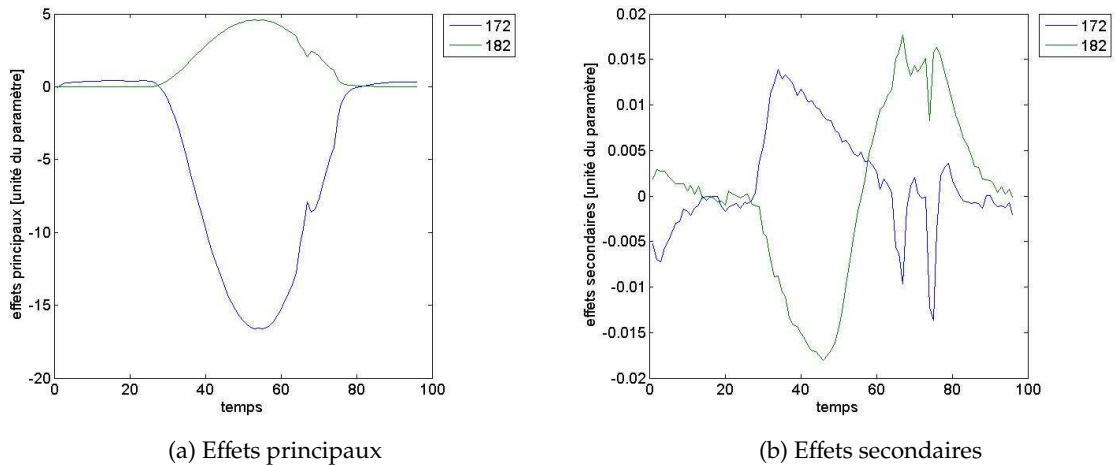


FIGURE IV.12 : Effets des paramètres sur la température de la lame d'air de l'ISOTEST 1.

Fréquence	Paramètres	Effet sur la sortie
172	h_{ce} de la tôle de toiture	-17°C
182	α_{ext} de la tôle de toiture	+4,5°C

Tableau IV.3 : Paramètres les plus influents sur la température de tôle de l'ISOTEST 1 et identifiés comme « optimisables ».

L'analyse de sensibilité présentée dans cette sous-partie a permis d'identifier le jeu de paramètres à optimiser pour tenter une validation du modèle. Ces paramètres sont le coefficient d'échange extérieur h_{ce} de la toiture et son coefficient d'absorption extérieur α_{ext} . C'est donc sur ces paramètres que la prochaine étape d'optimisation du modèle se focalisera.

IV.C.3 Optimisation du modèle de la cellule ISOTEST 1

Les deux paramètres trouvés précédemment (les coefficients d'échange convectif et d'absorption extérieurs) sont utilisés pour lancer une séquence d'optimisation sous Genopt. Afin de limiter les temps de calcul, un fichier météo représentatif d'une journée est utilisé pour le lancement de simulations.

Avant optimisation, le coefficient d'échange convectif moyen extérieur est 14,84 et le coefficient d'absorption est de 0,98. Ces valeurs sont utilisées comme valeurs initiales du problème d'optimisation (cf Tableau IV.4).

Paramètre	Valeur initiale	Valeur mini	Valeur maxi	Pas d'évolution
h_{ce} toiture	14,84	10	30	2,5
α_{ext}	0,98	0,7	0,98	0,05

Tableau IV.4 : Paramètres les plus influents sur la température de la lame d'air de l'ISOTEST 1 et identifiés comme « optimisables ».

Les résultats de cette première optimisation sont que le coefficient d'absorption ne change pas, mais que le coefficient d'échange convectif augmente, et passe à environ $18 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Cette valeur du coefficient d'échange correspond quasiment à celle obtenue avec un modèle convectif Sturrock. La modification du modèle est alors faite et une nouvelle simulation est lancée. Les résultats de cette simulation sont à nouveau comparés aux mesures (cf. Figure IV.13, Figure IV.14, Figure IV.15 et Figure IV.16).

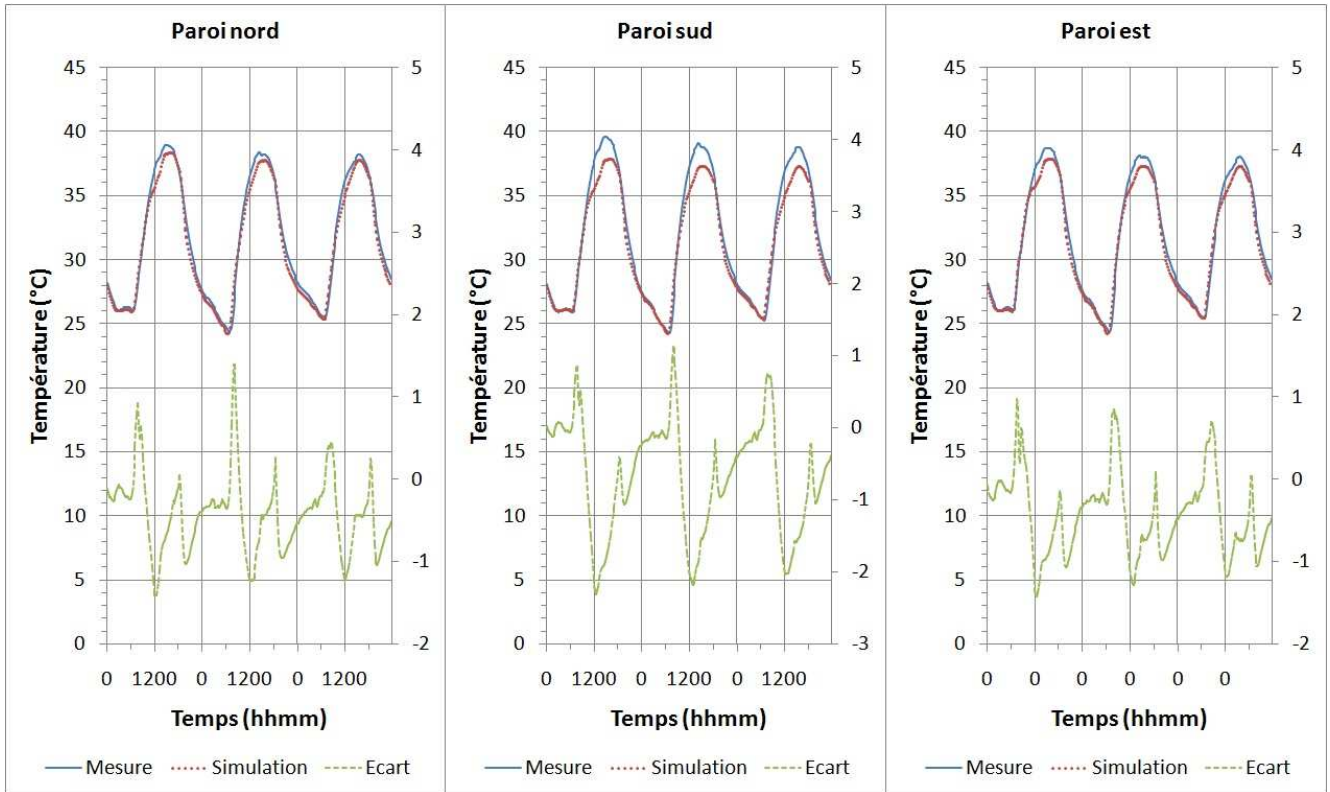


FIGURE IV.13 : Écarts modèle/mesure pour les parois de l'ISOTEST 1 après optimisation.

Emplacement	Ecart-type σ (°C)	Ecart maximum (°C)	Erreur (%)
Paroi nord	0,48	-2,00	4,36
Paroi sud	0,79	-2,97	6,46
Paroi est	0,50	-2,06	4,58
Air de l'enceinte	0,72	-2,92	6,25
Plafond	0,71	-2,72	5,25
Lame d'air sous tôle	1,37	5,37	8,93
Tôle	1,26	4,69	6,93

Tableau IV.5 : Écarts-types et écarts maximum de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 1.

En observant le Tableau IV.5, il est possible d'affirmer que le modèle est validé, car les erreurs maximales associées à chaque élément du bâtiment sont inférieures à 10%. De plus, les écarts-types restent faibles (moins d'un degré sauf pour les températures des éléments de la toiture).

En ce qui concerne les éléments de la toiture, ils sont plus sensibles aux sollicitations de l'environnement, surtout face au rayonnement solaire. Cela s'explique facilement par le fait que c'est en grande

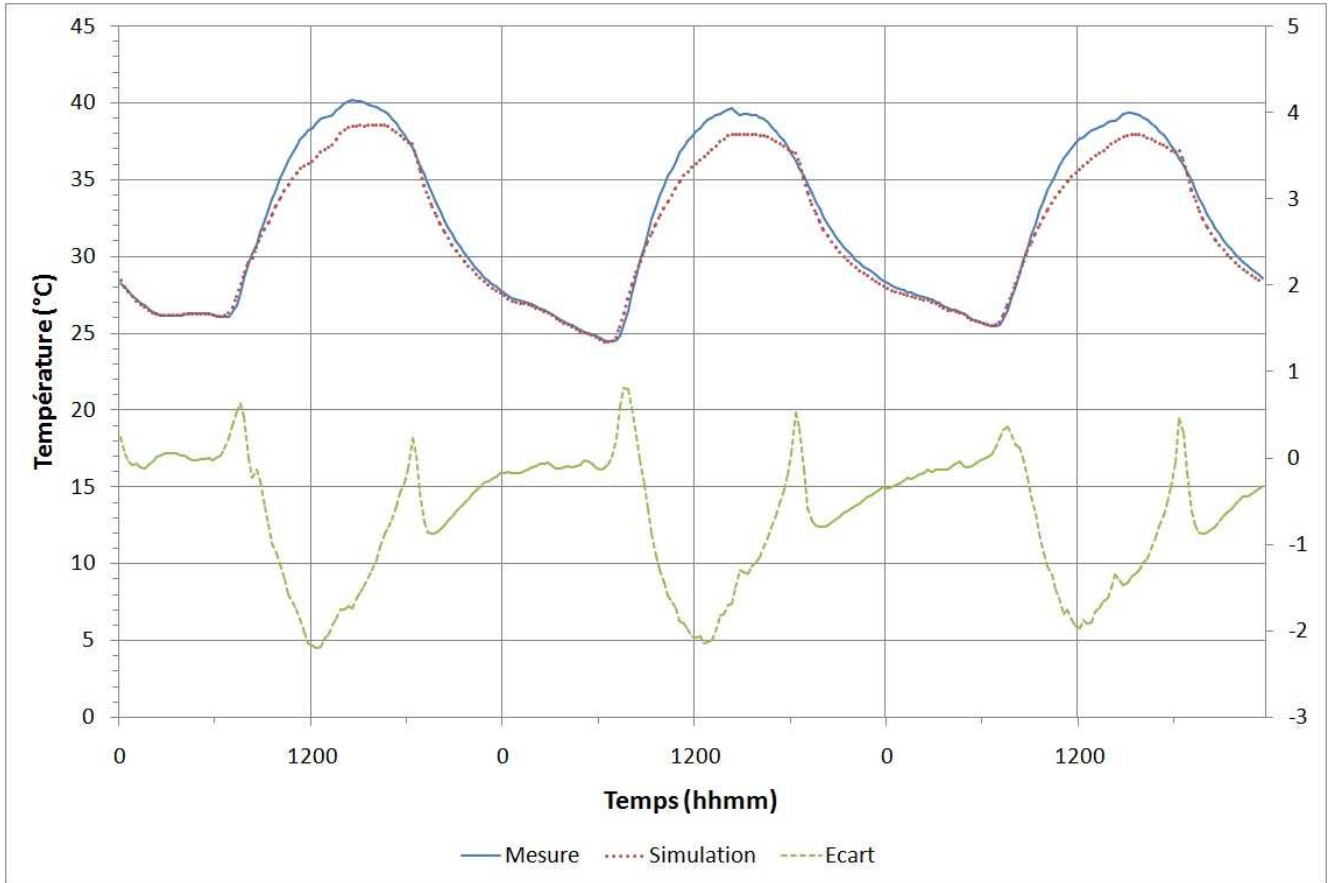


FIGURE IV.14 : Écarts modèle/mesure pour l'air de l'enceinte de l'ISOTEST 1 après optimisation.

partie la toiture qui absorbera ce rayonnement.

Ce qu'il est intéressant de noter dans cette étude, et qui conforte la validation du modèle, c'est que sur la Figure IV.16, un pic régulier est constaté tous les jours vers 7h du matin. Ce pic est dû à une mesure erronée du flux solaire. Pour être plus précis, la mesure en elle-même n'est pas erronée, mais l'endroit où elle est prise ne reçoit pas la même quantité de flux solaire que les cellules ISOTEST à ce moment de la journée à cause des effets de masques proches autour des cellules et de la station météorologique. En effet, les cellules restent à l'ombre d'un bâtiment situé non loin plus longtemps que la station météorologique. D'autres effets similaires peuvent exister, mais sont moins identifiables, comme pour le vent en particulier.

Remarque : Pour éviter ce genre de désagréments à l'avenir, il faudrait que la prise de mesure des conditions météorologiques se fasse au plus près des expérimentations, voir sur les expérimentations concernées. Dans ce but, une station météorologique portable a été acquise dernièrement pour de futures expérimentations.

Avant de poursuivre sur l'étude du modèle de bâtiment BIPV, une dernière étape est nécessaire : la corroboration des résultats.

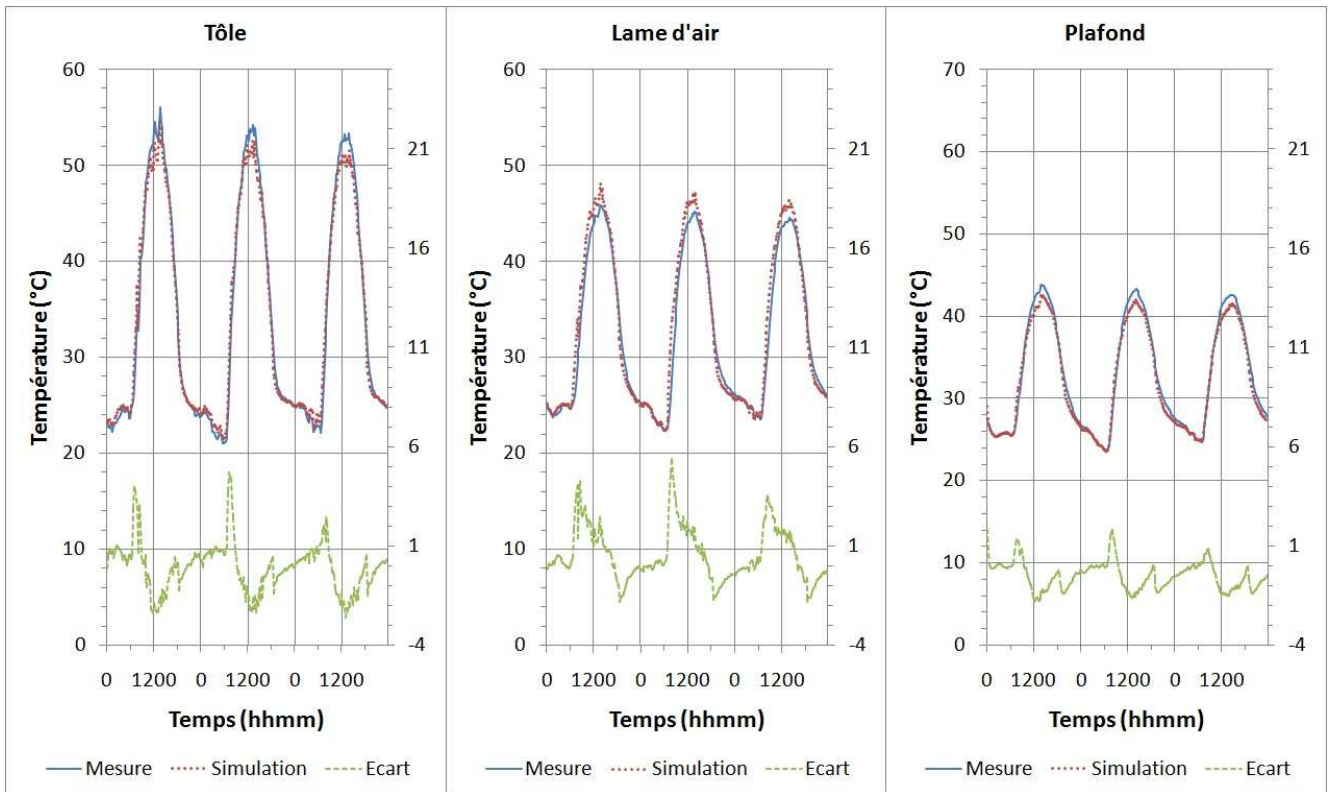


FIGURE IV.15 : Écarts modèle/mesure pour les éléments de la toiture de l'ISOTEST 1 après optimisation.

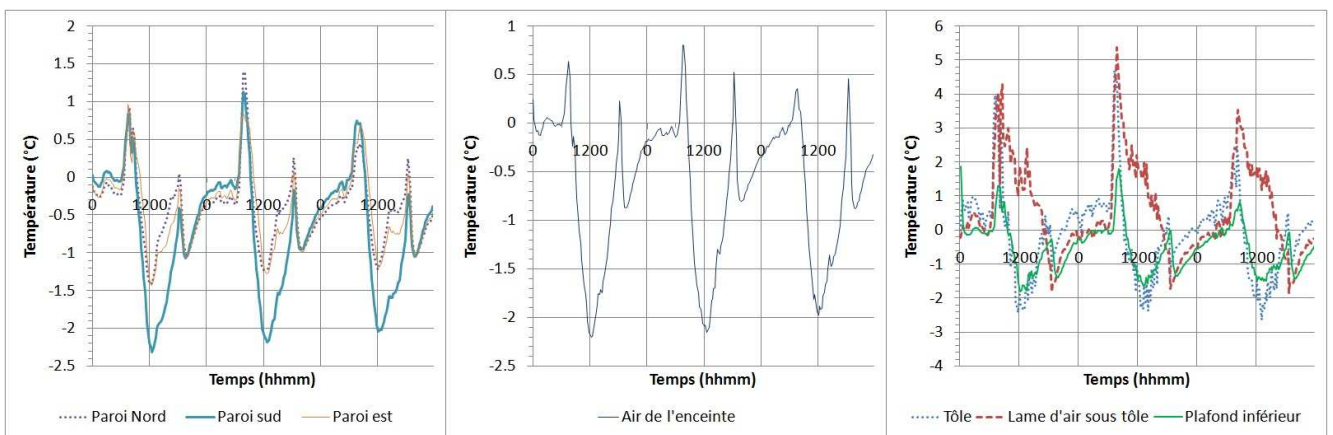


FIGURE IV.16 : Écarts modèle/mesure pour les différents éléments de l'ISOTEST 1 après optimisation.

IV.C.4 Corroboration des résultats pour le modèle de la cellule ISOTEST 1

La corroboration des résultats est une confrontation des résultats du modèle aux mesures. Cependant, elle diffère des confrontations précédentes par le fait de changer de période d'étude. Ainsi, la justesse du modèle dans des conditions environnementales différentes peut être vérifiée. De plus, cette étape si elle est validée permet d'élargir le champ d'application du modèle. En effet, elle va permettre de s'assurer que l'optimisation n'a pas « calé » les paramètres du modèles pour des conditions expérimentales spécifiques.

Pour les séquences précédentes, le fichier météorologique était celui de la fin du mois de Janvier 2009.

Dans cette phase de corroboration, le fichier météorologique est celui des 27 et 28 Février 2009. Comme lors des étapes de confrontations précédentes les simulations sont lancées et les résultats comparés aux mesures. Cette fois-ci, si la comparaison valide une nouvelle fois le modèle de bâtiment dans la marge des 10% de l'amplitude maximale de la mesure, le modèle peut être élargi à d'autres périodes de conditions environnementales différentes.

Les Figure IV.17, Figure IV.18, Figure IV.19 et Figure IV.20 présentent les résultats de la corroboration. Comme on peut le constater, la dynamique est toujours respectée. En revanche, les écarts modèles/mesures sont légèrement plus importants en ce qui concerne les parois verticales et l'air de l'enceinte du bâtiment. Cela peut être dû à un « calage » trop important des paramètres pour des conditions environnementales spécifiques. Cependant, malgré des écarts plus importants, le modèle peut être validé avec des erreurs inférieures à 10% de l'amplitude maximale de la mesure et des écarts types du même ordre que lors de l'étape de validation, soit environ 1°C (cf Tableau IV.6 p.130).

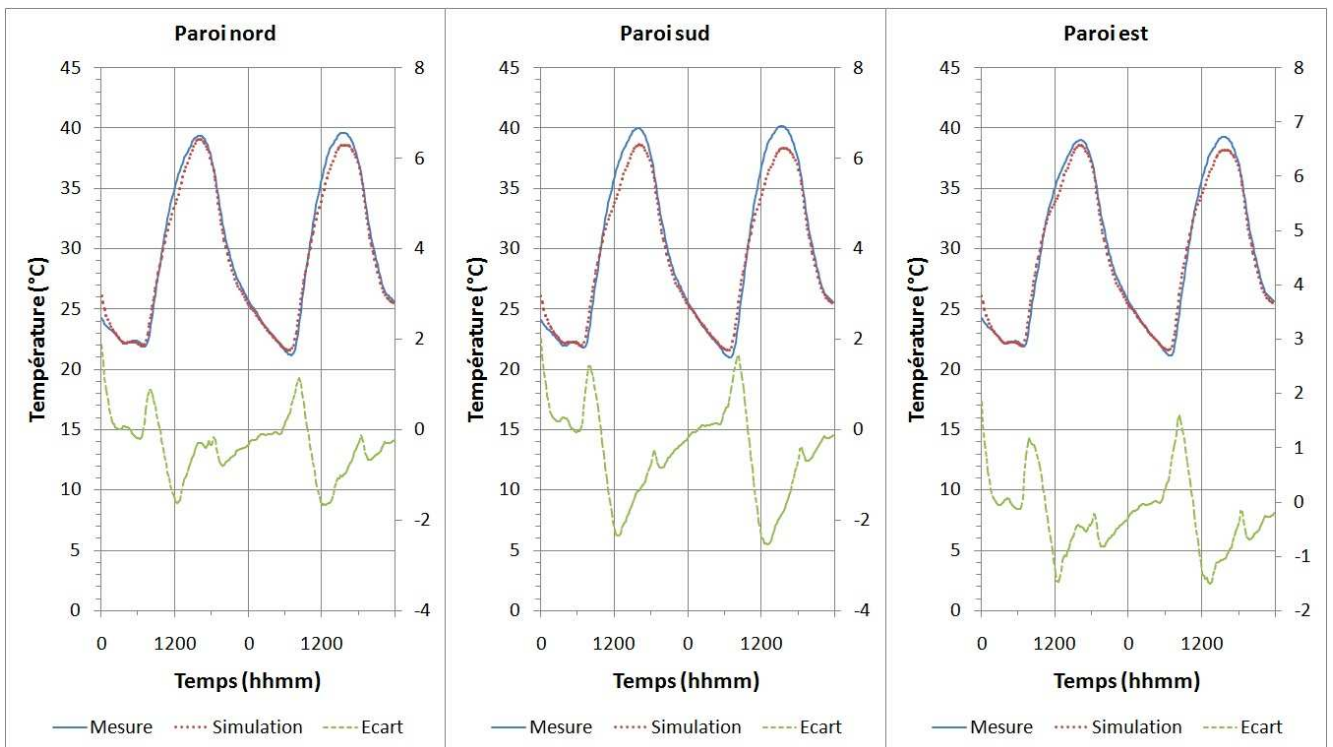


FIGURE IV.17 : Écarts modèle/mesure pour les parois de l'ISOTEST 1 lors de la phase de corroboration.

Emplacement	Ecart-type σ (°C)	Ecart maximum (°C)	Erreur (%)
Paroi nord	0,65	1,89	4,77
Paroi sud	1,03	-2,53	6,29
Paroi est	0,69	1,84	4,69
Air de l'enceinte	1,12	-3,06	7,47
Plafond	1,21	2,98	6,59
Lame d'air sous tôle	1,07	2,71	5,66
Tôle	1,58	-4,01	6,68

Tableau IV.6 : Écarts-types et écarts maximum de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 1 lors de la phase de corroboration.

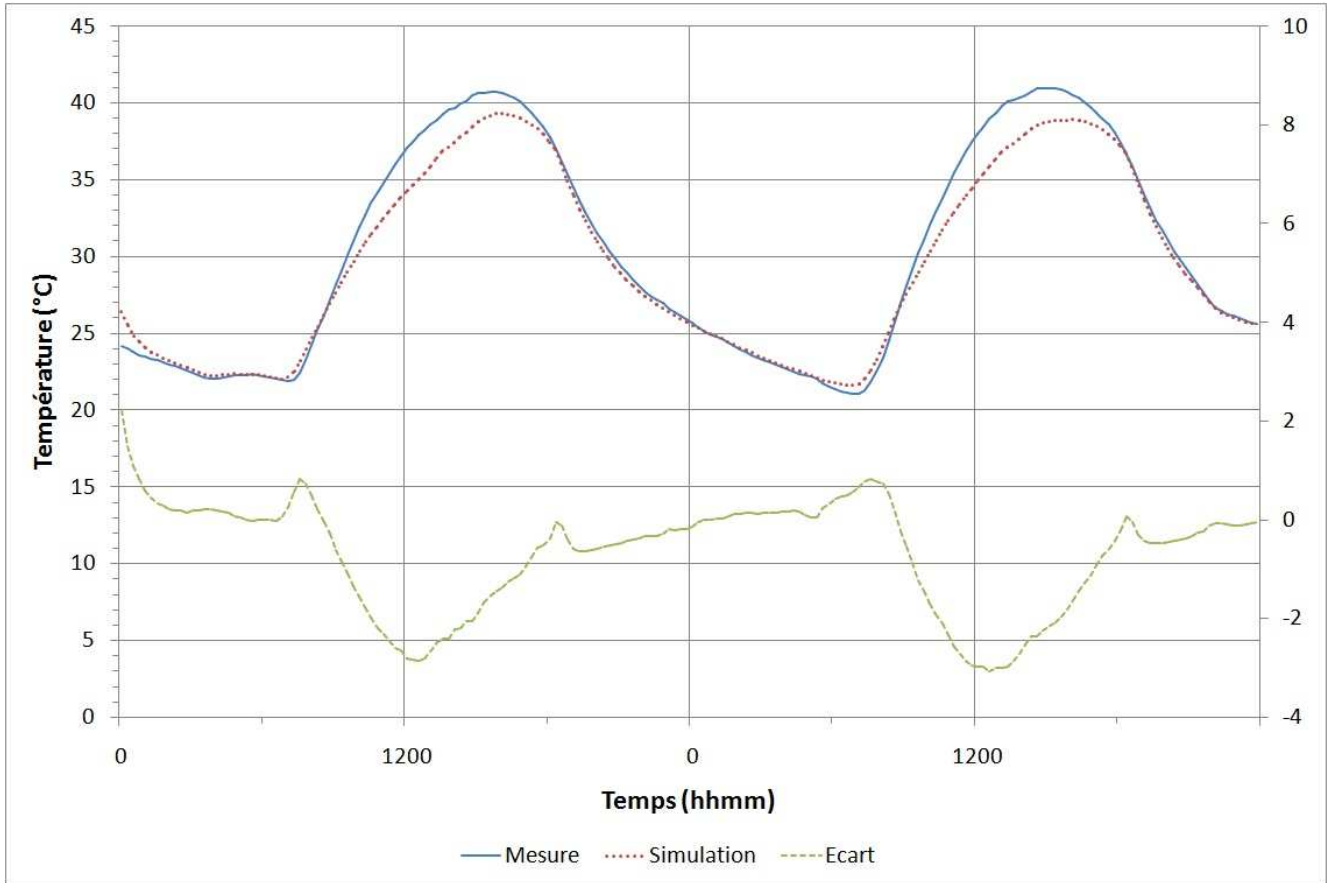


FIGURE IV.18 : Écarts modèle/mesure pour l'air de l'enceinte de l'ISOTEST 1 lors de la phase de corroboration.

Le modèle de bâtiment simple vient donc d'être validé et corroboré. La suite de ce chapitre va maintenant se consacrer à valider le modèle de bâtiment équipé de panneau(x) photovoltaïque(s) installé(s) en toiture.

IV.D ÉTUDE 2 : APPLICATION DE LA MÉTHODE DE VALIDATION AUX CELLULE ISO-TEST 2 ET 3

Dans cette partie, le modèle de bâtiment BIPV fait l'objet du processus de validation. Tout d'abord, les résultats de simulations des modèles des cellules 2 et 3 sont confrontés aux mesures. Puis, une analyse de sensibilité est menée sur chacun des modèles. Enfin, les modèles sont optimisés. Chacune de ces étapes sont organisées en deux sous-parties, la première traite de la validation du modèle de la cellule équipée d'un panneau PV avec lame d'air confinée (cellule 2), et la seconde de celle équipée d'un panneau PV avec lame d'air ouverte (cellule 3).

Ici, les configurations des cellules diffèrent de la configuration de référence essentiellement par une modification du complexe de toiture. Par la suite, seront donc présentées plus particulièrement les informations se rapportant à ce complexe de toiture, mais aussi à l'air de l'enceinte, l'un des objectifs du code

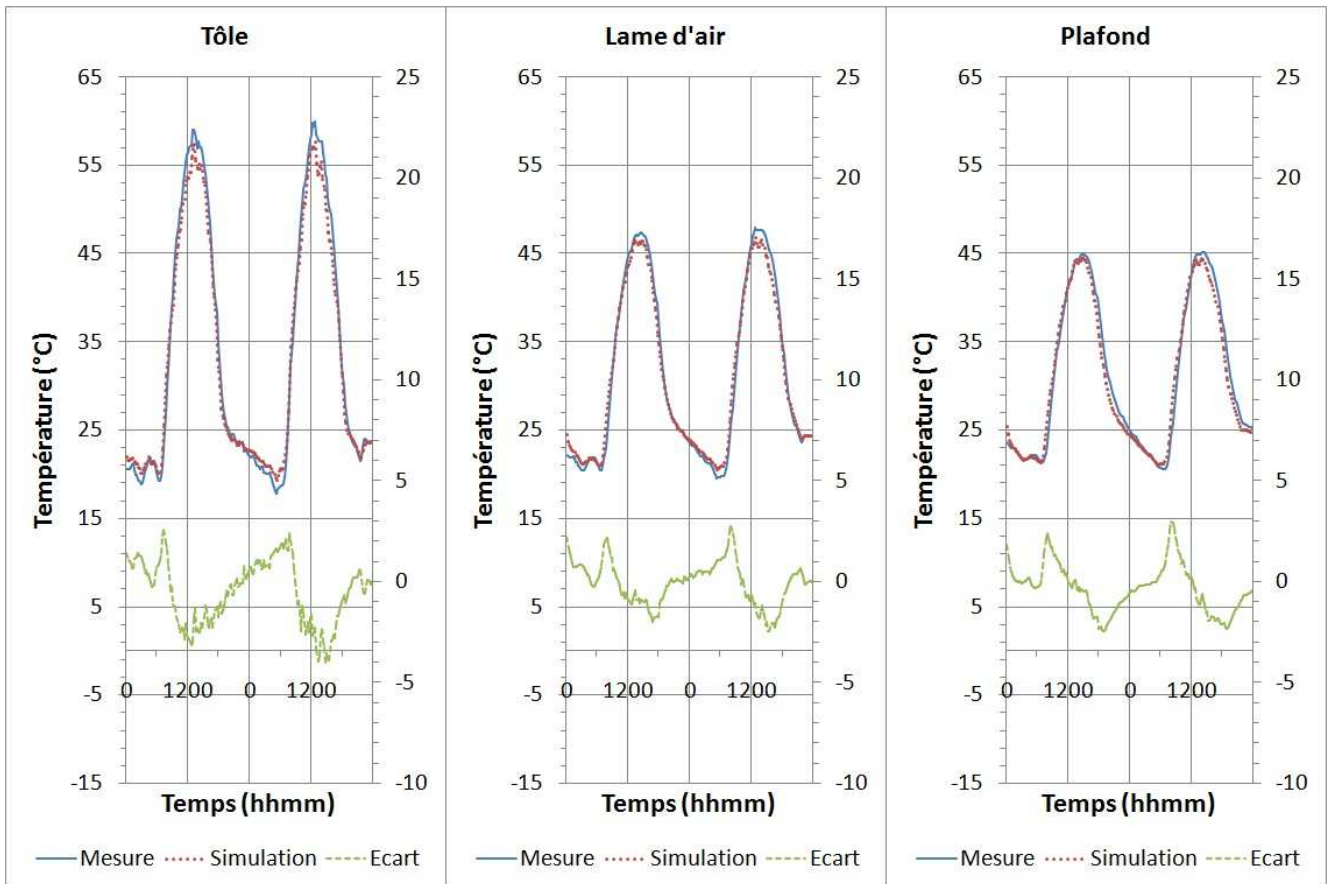


FIGURE IV.19 : Écarts modèle/mesure pour les éléments de la toiture de l'ISOTEST 1 lors de la phase de corroboration.

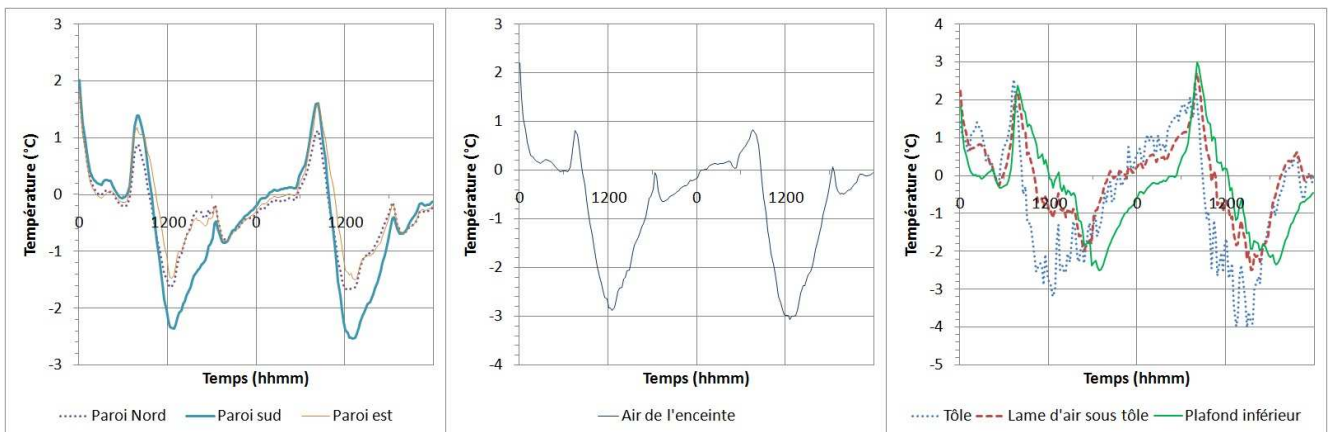


FIGURE IV.20 : Écarts modèle/mesure pour les différents éléments de l'ISOTEST 1 lors de la phase de corroboration.

étant de pouvoir y étudier le confort thermique. Référence sera faite aux autres éléments du bâtiments lorsqu'ils permettront d'apporter des précisions ou des explications au fil de notre raisonnement.

Remarque : La description des deux bâtiments s'est faite en se basant sur la description de la cellule ISOTEST de référence validée à l'étape précédente et en y ajoutant un panneau photovoltaïque selon les

configurations de l'expérimentation.

IV.D.1 Validation de la cellule ISOTEST 2

IV.D.1.a Confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 2

Dans le cas de la cellule 2, la cellule équipée d'une lame d'air confinée au-dessous du panneau photovoltaïque, les sorties du modèles étudiées ont été les suivantes :

- La température de surface intérieure de la paroi nord ;
- La température de surface intérieure de la paroi ouest ;
- La température d'air de l'enceinte ;
- La température de la lame d'air sous toiture ;
- La température de surface intérieure de la tôle de toiture ;
- La température de la lame d'air sous le panneau photovoltaïque (plus tard appelée lame d'air sous PV) ;
- La température de face inférieure du panneau photovoltaïque (plus tard appelée face inférieure PV) ;
- Le productible PV.

La modélisation de cette cellule ISOTEST paraissait dès le départ complexe vu la méconnaissance de certaines propriétés physiques du panneau photovoltaïque et les doutes quant à la justesse des modèles convectifs appliqués à des lames d'air aussi fines. Malgré cela, les Figure IV.21, Figure IV.22 et Figure IV.23 montrent que la dynamique du modèle reste aussi bonne qu'elle l'avait été pour la cellule de référence, même si des écarts apparaissent.

En plus des écarts présents au niveau de la modélisation des températures, un écart important est constaté au niveau de la production photovoltaïque, une surestimation du productible par rapport au modèle utilisé comme référence. Les modèles thermiques et électriques étant couplés dans *ISOLAB*, il est probable que l'origine des écarts sur ces deux types de sortie soit la même. En traçant les écarts modèles mesures pour les différents éléments de la cellule ISOTEST 2, on obtient la Figure IV.24.

La Figure IV.24 montre que les écarts sont plus importants pour les éléments de la toiture PV. Ce qui veut dire que c'est cette partie du bâtiment qui est mal modélisée. Ceci expliquerait une erreur dans l'estimation du productible PV. En effet, si le flux traversant la face arrière du panneau PV est mal calculé, du fait des phénomènes radiatifs d'inter-réflexions, le flux absorbé par la couche de silicium peut lui aussi être erroné.

Les écarts, écarts types et erreurs des différents éléments du bâtiment sont présentés dans le Tableau IV.7.

Les écarts-types les plus importants au niveau de la température proviennent des éléments de la toiture. Il semble que l'erreur soit la plus forte pour la température de face inférieure du panneau photovoltaïque, et qu'elle se propage ensuite vers l'intérieur du bâtiment à travers les différents éléments de la toiture. Il serait donc judicieux de focaliser les efforts d'optimisation sur cette sortie du modèle en particulier, en association avec la sortie donnant le productible PV.

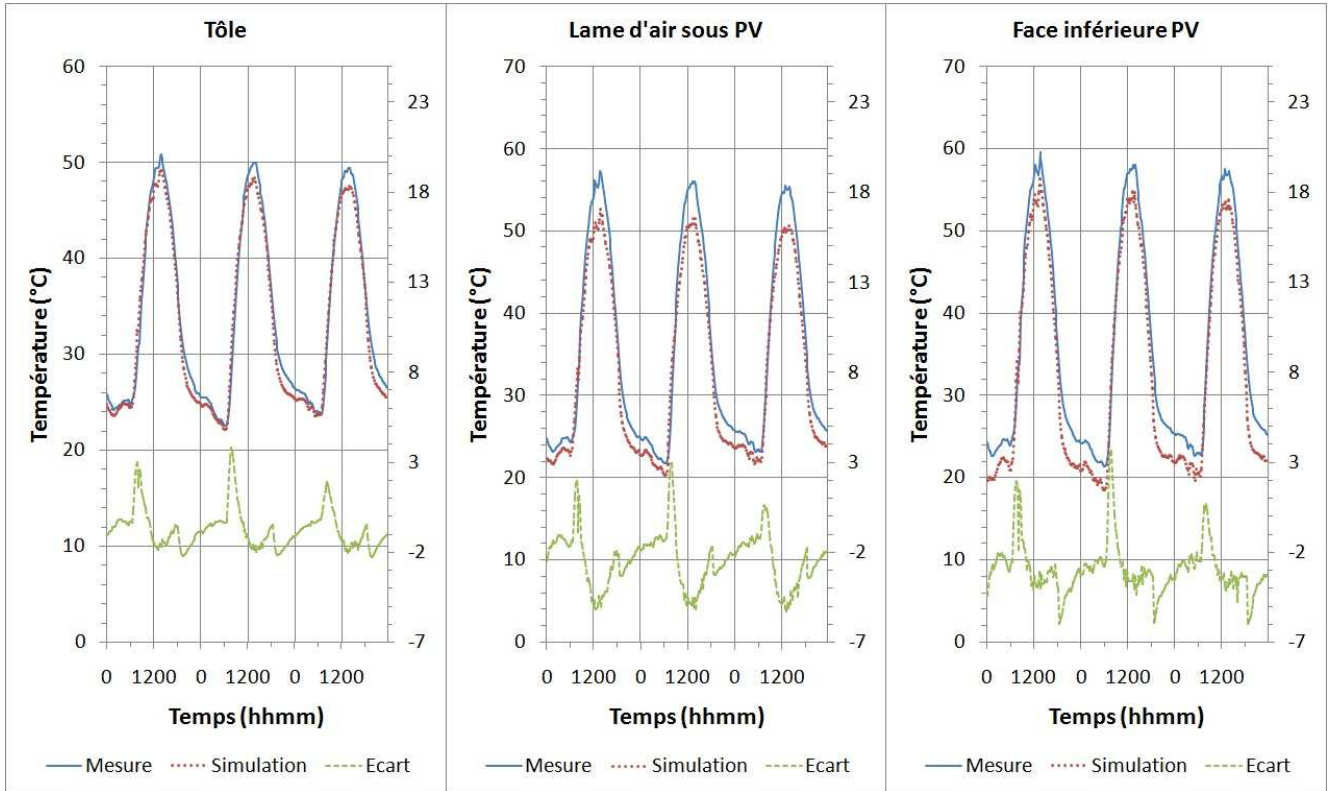


FIGURE IV.21 : Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour une partie des éléments de la toiture PV de l'ISOTEST 2.

Comme dans les cas précédents, cela peut s'expliquer par des paramètres mal connus. En effet, certains des paramètres du panneau photovoltaïque ont été estimés, il y a donc de fortes chances que les écarts observés viennent de ces estimations. Ces estimations ont également pu engendrer l'erreur d'estimation du productible PV.

La Figure IV.24 présente les différents écarts modèle/mesure des températures étudiées, et des écarts maximums pouvant aller jusqu'à 20°C et 30°C sont visibles pour les températures de lame d'air sous PV et de face inférieure de panneau PV. Le modèle de toiture photovoltaïque est mis en cause par ces

Emplacement	Ecart-type σ (°C ou W)	Ecart maximum (°C ou W)	Erreur (%)
Paroi nord	1,25	-3,57	8,12
Paroi est	1,23	-3,42	7,76
Air de l'enceinte	1,10	-3,64	8,16
Lame d'air sous tôle	2,68	4,99	8,09
Tôle	1,40	-4,27	7,01
Lame d'air sous PV	1,74	-8,41	11,96
Face inférieure PV	1,90	-10,22	14,27
Productible PV	3,74	9,98	15,54

Tableau IV.7 : Écarts-types, écarts maximum et erreurs de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 2.

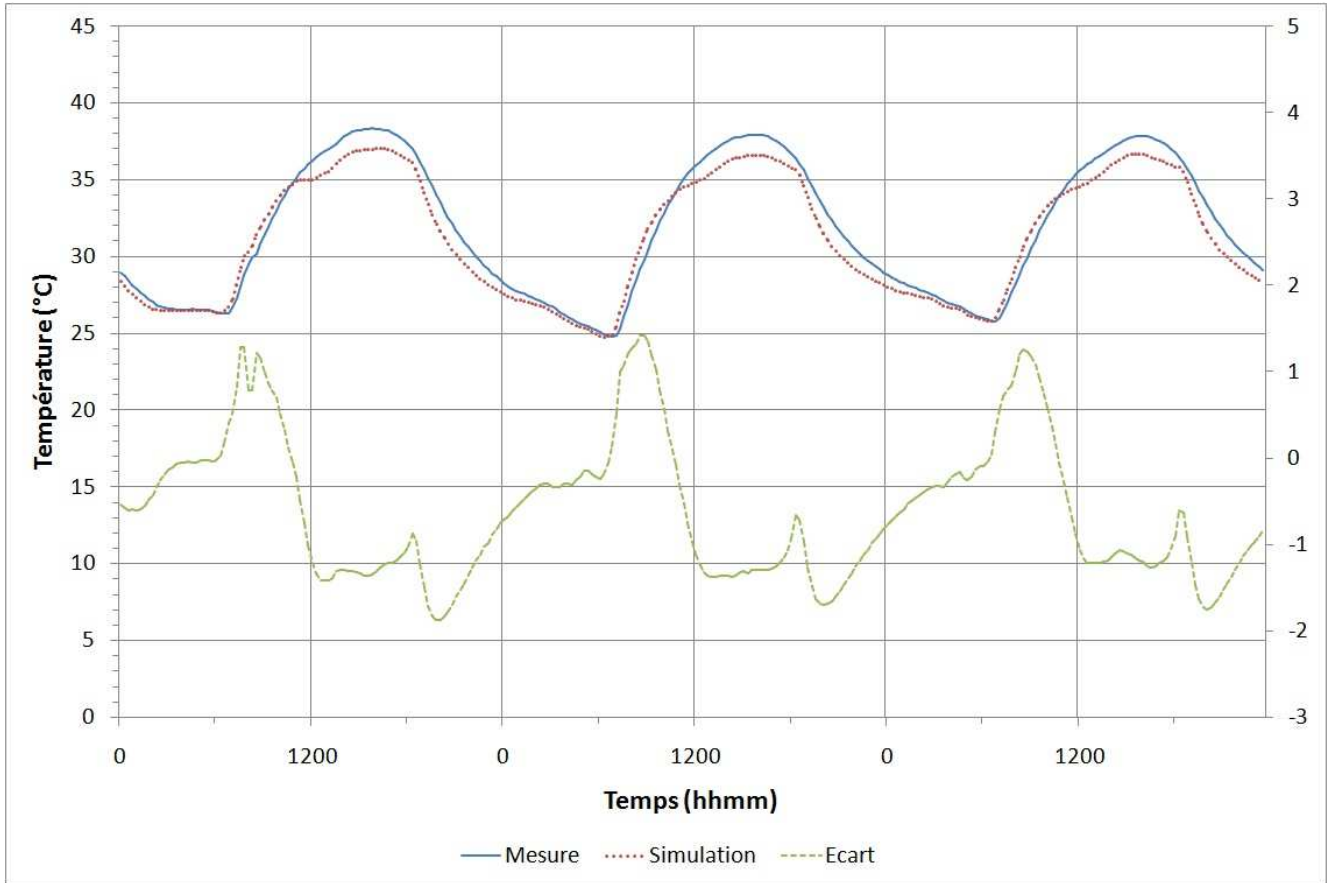


FIGURE IV.22 : Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour l'air de l'enceinte de l'ISOTEST 2.

résultats. Ceci peut-être dû à deux raisons. La première est que le modèle de panneau PV développé n'est pas approprié. La seconde est que les paramètres décrivant le panneau PV ne sont pas corrects. Étant donné que ces paramètres ont été estimés selon leurs valeurs les plus plausibles, et que pour des lames d'air aussi fines (4 cm d'épaisseur) le modèle convectif peut ne pas être adéquat. Cette seconde raison est la plus vraisemblable. Cette hypothèse sera vérifiée lors de la séquence d'optimisation. Si aucun jeu de paramètres réalistes n'est obtenu après optimisation du modèle, cela voudra dire que c'est bien la modélisation qui pose problème et non un mauvais calage des paramètres.

Aux regards de ces résultats, la modélisation de l'ISOTEST 2 n'est donc pas valide. Une séquence d'optimisation sera dans ce cas aussi nécessaire. Il faut donc dans premier temps identifier les paramètres à optimiser à l'aide d'une analyse de sensibilité, puis optimiser ces paramètres.

IV.D.1.b Analyse de sensibilité de la cellule ISOTEST 2

La particularité de l'analyse de sensibilité effectuée sur cette ISOTEST est que deux jeux de paramètres influents peuvent être obtenus en fonction de la sortie choisie. Le premier jeu de paramètres apparaît pour toutes les sorties traitant d'une température d'un des éléments de la toiture PV (température de tôle, température de lame d'air sous PV, température de face inférieure PV, etc.) et va caractériser les échanges de chaleur à travers le panneau PV et la toiture. Le deuxième jeu de paramètres apparaît lorsque la

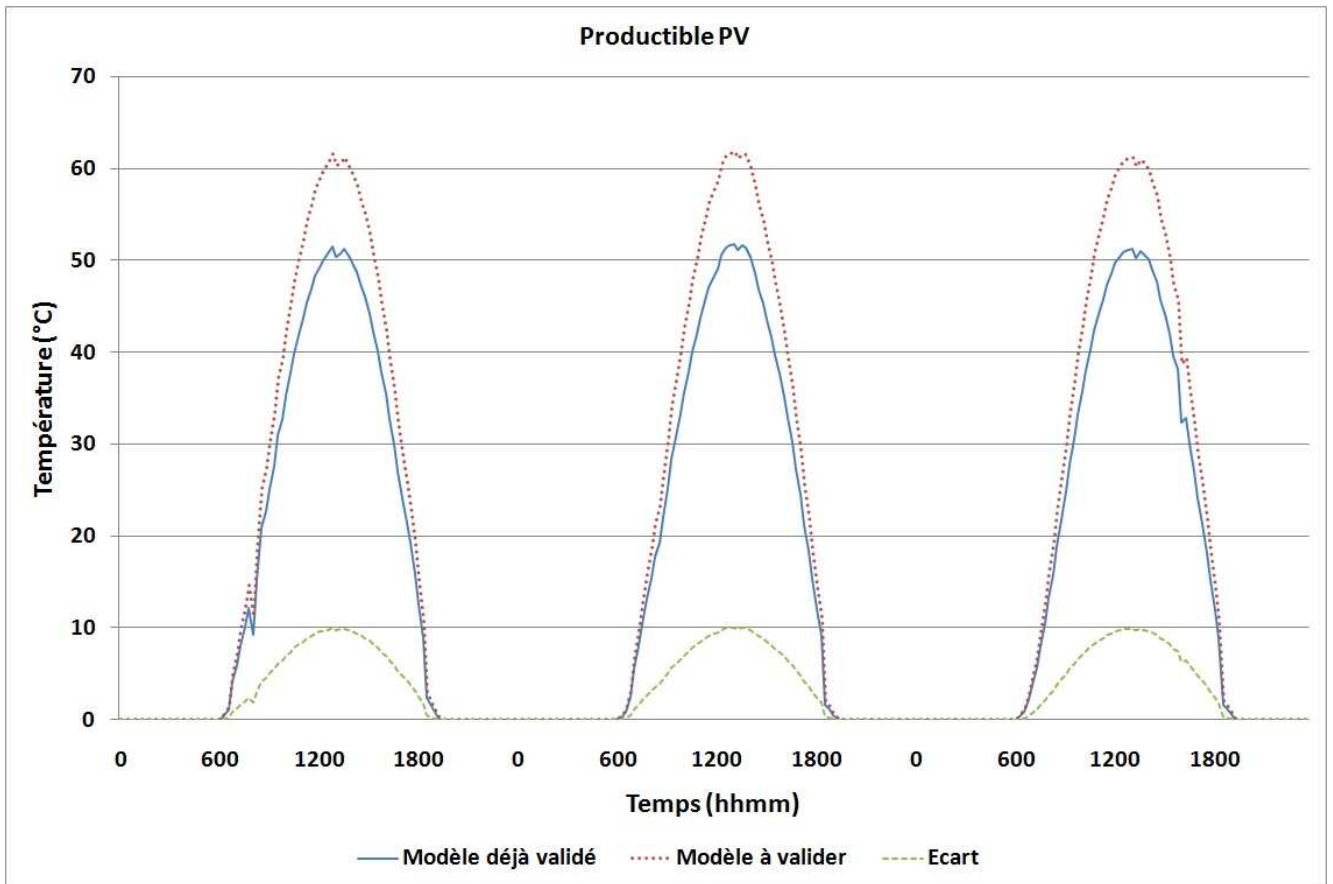


FIGURE IV.23 : Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour le productible photovoltaïque de l'ISOTEST 2.

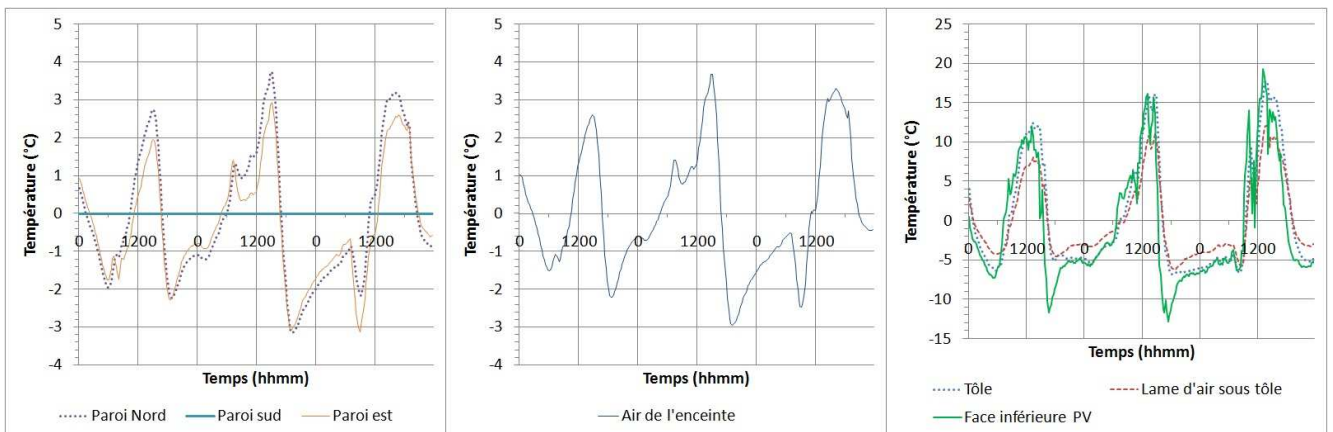


FIGURE IV.24 : Écarts modèle/mesure pour les températures des différents éléments de l'ISOTEST 2.

sortie choisie est la production électrique du panneau photovoltaïque et va caractériser la capacité du panneau photovoltaïque à transformer le rayonnement reçu en électricité. Ces deux jeux de paramètres sont présentés dans les Tableau IV.8 p.139 et Tableau IV.9 p.139 et sont issus de l'analyse des Figure IV.25 et Figure IV.26 pour la face inférieure PV et des Figure IV.27 et Figure IV.28 pour le productible PV.

En analysant les Tableau IV.8 et Tableau IV.9, en procédant comme avec la cellule ISOTEST 1, on

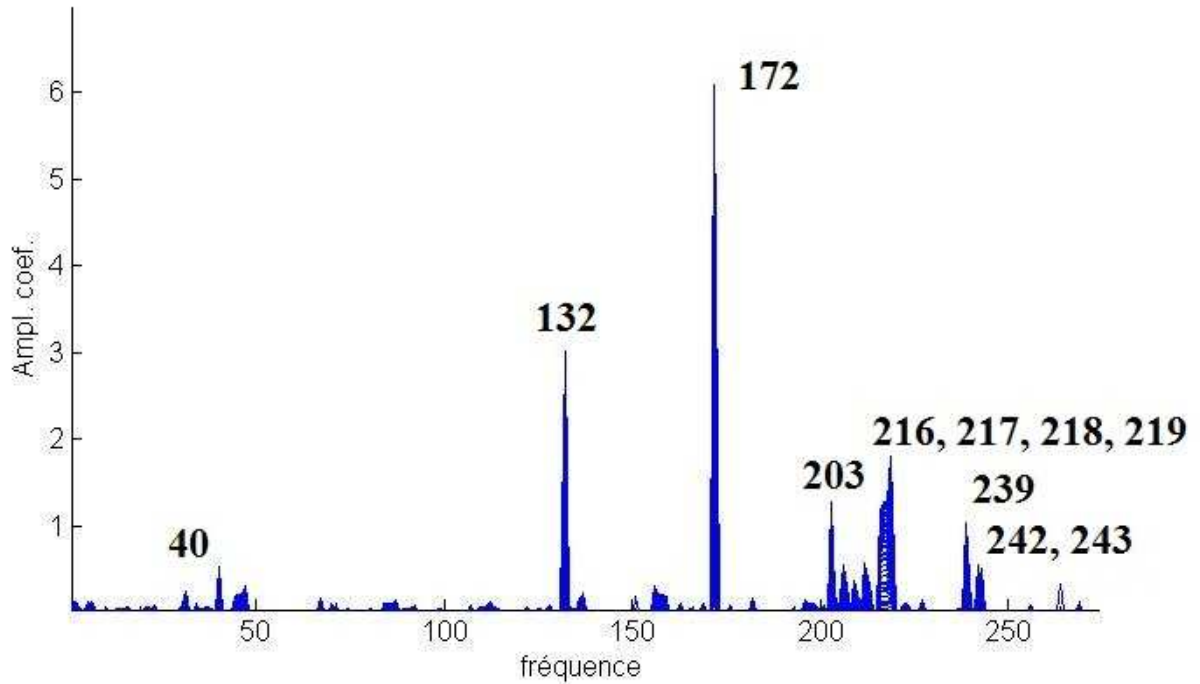


FIGURE IV.25 : Spectre de Fourier obtenu par rapport à la température de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 2.

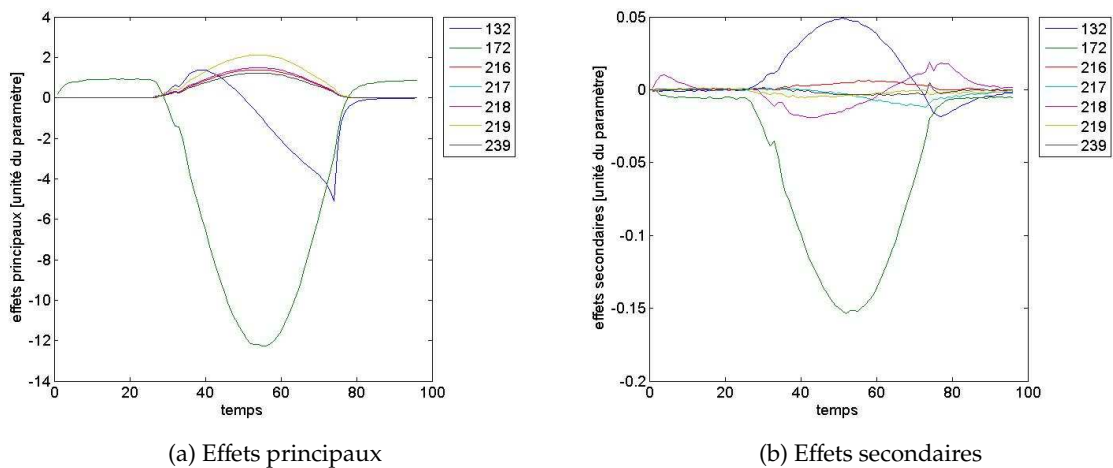


FIGURE IV.26 : Effets des paramètres sur la température de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 2.

peut identifier le jeu de paramètres à optimiser pour pouvoir modéliser correctement le bâtiment (cf Tableau IV.10 p.140). Dans ce tableau, l'azimut de la toiture a été éliminée pour les mêmes raisons que précédemment. La masse volumique ρ_v du tedlar et sa capacité thermique C_p ont été éliminées de la sélection parce qu'elles sont connues, tout comme le coefficient d'absorption α_1 du silicium polycristallin (0,06). Ce dernier représente la quantité maximale de rayonnement solaire que du silicium seul pourrait convertir en électricité. Enfin le coefficient d'échange convectif extérieur de la toiture a été considéré comme étant égal à celui de la cellule 1, puisque celui-ci n'est fonction que du vent et que les deux cellules sont supposées soumises aux mêmes conditions météorologiques.

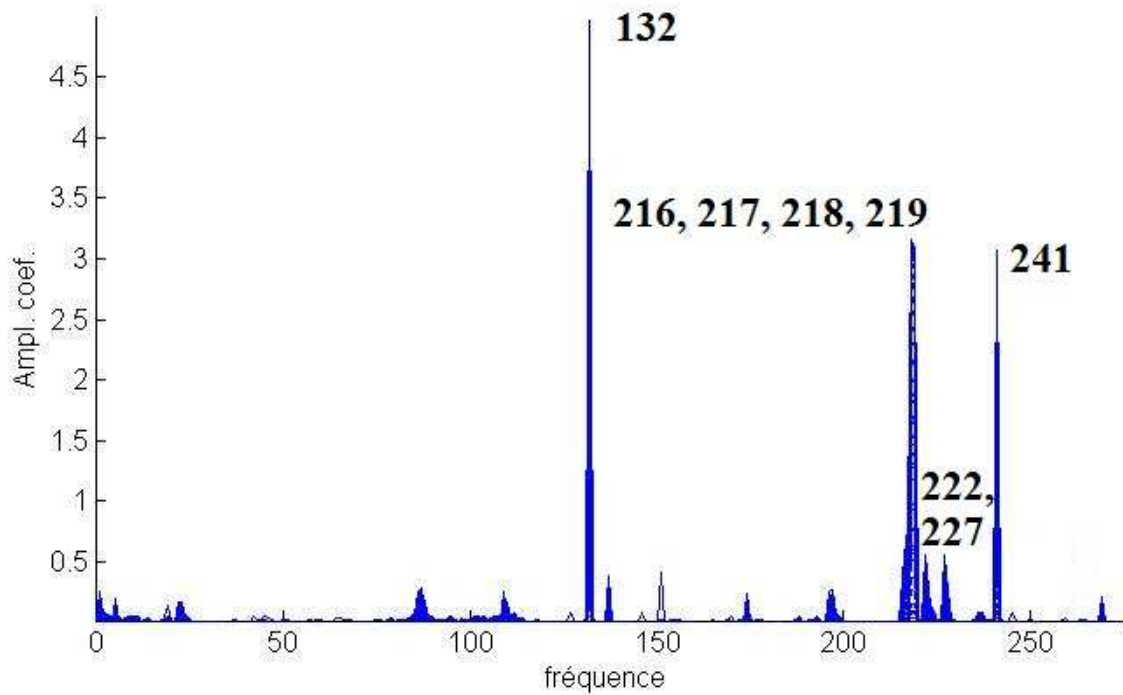


FIGURE IV.27 : Spectre de Fourier obtenu par rapport au productible PV de la cellule ISOTEST 2.

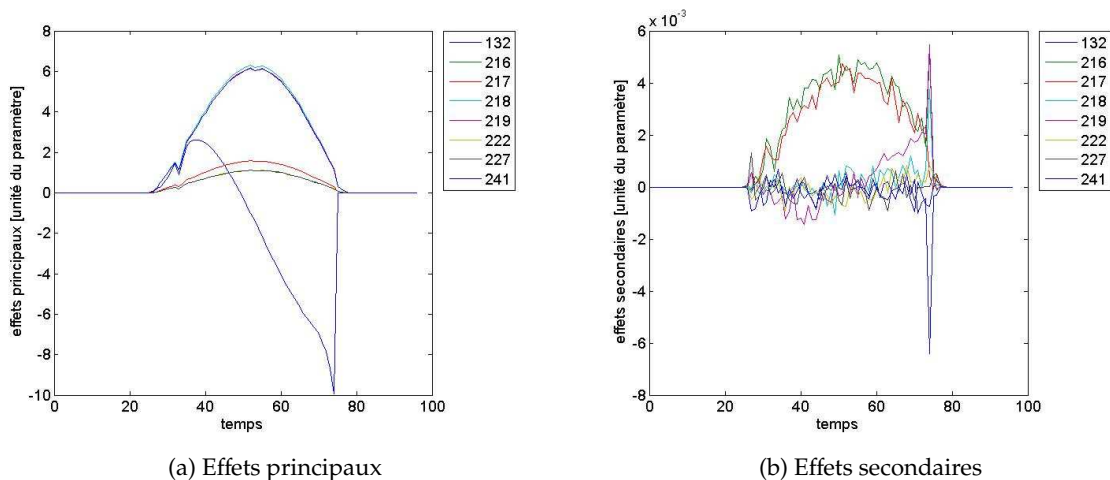


FIGURE IV.28 : Effets des paramètres sur le productible PV de la cellule ISOTEST 2.

Les rendements de panneau supérieurs à cette valeur de 6% sont obtenus par le biais des traitements physico-chimiques des surfaces des matériaux encapsulant le silicium et permettant de « piéger » la lumière, qui passe ainsi plusieurs fois par la couche de silicium avant de s'échapper du système où être absorbée par d'autres couches. C'est de là que vient le secret industriel sur les propriétés radiatives des couches. En effet, les phénomènes d'inter-réflexions dans le milieu multi-couches semi-transparent permettent de multiples combinaisons de propriétés radiatives aboutissant chacune à un rendement particulier.

Sur les Figure IV.26 et Figure IV.28, les phénomènes d'inter-réflexions se traduisent par l'importance

Fréquence	Paramètres
40	Épaisseur du plafond
132	Azimut de la toiture
172	Coefficient d'échange convectif extérieur de la toiture
203	Masse volumique du tedlar
206	Masse volumique de l'EVA
212	Capacité calorifique de l'EVA
216	τ_1 de la seconde couche d'EVA
217	τ_1 du silicium
218	τ_1 de la première couche d'EVA
219	τ_1 du verre
239	α_1 du tedlar
242	α_1 de la première couche d'EVA
243	α_1 du verre

Tableau IV.8 : Paramètres les plus influents sur la température de face inférieure PV de l'ISOTEST 2.

Fréquence	Paramètres
132	Azimut de la toiture
216	τ_1 de la seconde couche d'EVA
217	τ_1 du silicium
218	τ_1 de la première couche d'EVA
219	τ_1 du verre
222	τ_2 de la seconde couche d'EVA
227	ρ_1 du tedlar
241	α_1 du silicium

Tableau IV.9 : Paramètres les plus influents sur le productible PV de l'ISOTEST 2.

des effets secondaires (qui représentent les interactions des paramètres radiatifs). Prenons en exemple le rayon de lumière qui va arriver sur le panneau photovoltaïque. Il va traverser différentes couches, sur lesquelles il sera en partie absorbé et réfléchi, ces réflexions étant transmises à d'autres couches qui vont à leur tour les absorber, les transmettre et les réfléchir en partie etc. (cf Figure II.6). Ainsi, l'évolution d'un des paramètres pourra influencer l'évolution des autres paramètres de part le fait qu'il changera la valeur du flux arrivant sur chaque couche.

Il faudra donc prendre en compte ces interactions au fil de l'optimisation des paramètres concernés lors d'une seule et même séquence.

IV.D.1.c Optimisation du modèle de la cellule ISOTEST 2

Pour optimiser ce modèle, deux sorties ont été prises en compte en fonction des résultats de l'étape de confrontation du modèle aux mesures. Cette étape a mis en évidence que la température la moins bien modélisée était celle de la face inférieure du panneau PV, mais aussi que le productible photovoltaïque était mal estimé. L'optimisation a donc été menée sur ces deux sorties en calculant la somme des écarts-

Fréquence	Paramètres
171	h_{ce} toiture
215	τ_1 de la seconde couche d'EVA
216	τ_1 du silicium
217	τ_1 de la première couche d'EVA
218	τ_1 du verre (panneau PV)
238	α_1 du tedlar
241	α_1 de l'EVA
249	h_c de la lame d'air sous PV

Tableau IV.10 : Paramètres identifiés comme « optimisables » pour les températures des éléments de la toiture et le productible PV pour la cellule ISOTEST 2.

types de leurs écarts modèles/mesures respectifs sur la période de simulation, selon la méthode proposée et en utilisant le jeu de paramètre fourni par le Tableau IV.10.

Avant de continuer, il faut préciser que généralement, l'EVA a les mêmes propriétés optiques que le verre, ou en tout cas des propriétés qui s'en approchent. Pour faciliter la convergence de l'optimisation et dans un souci d'éviter du temps de calcul inutile, les paramètres de l'EVA ont été « calés » sur ceux du verre pendant les séquences d'optimisation. De plus, il faut garder en tête que les couches supérieures du panneau photovoltaïque sont conçues et assemblées de manière à absorber le moins d'énergie possible tout en réfléchissant le moins possible vers l'extérieur. Seul la couche arrière du système peut être réfléchissante lorsque l'on veut augmenter le rendement du panneau en renvoyant la lumière vers le semi-conducteur.

Une première séquence d'optimisation a alors été lancée sur le coefficient de transmission du verre (τ_1) en prenant comme fonction de coût l'écart-type modèle/mesure sur le productible PV en s'appuyant sur les résultats de l'analyse de sensibilité présentés dans le Tableau IV.9. Ce paramètre est un paramètre qui engendre automatiquement la modification d'au moins un autre paramètre afin de respecter la propriété radiative suivante : $\alpha + \tau + \rho = 1$. La première particularité radiative des couches semi-transparentes d'un système photovoltaïque est qu'elles sont généralement conçues de manière à absorber le moins d'énergie possible, ceci afin de limiter l'échauffement du panneau, et donc l'influence de la température sur son rendement. On a donc posé le système d'équations suivant pour respecter ces hypothèses :

$$\begin{aligned}
 \tau_{1,verre} &= 0,95 - \rho_{1,verre} \\
 \tau_{2,verre} &= 0,95 - \rho_{2,verre} \\
 \alpha_{1,verre} &= \alpha_{2,verre} = 0,05 \\
 \alpha_{1,EVA} &= \alpha_{2,EVA} = 0,05 \\
 \rho_{1,EVA} &= \rho_{1,verre} \\
 \rho_{2,EVA} &= \rho_{2,verre} \\
 \tau_{1,EVA} &= \tau_{1,verre} \\
 \tau_{2,EVA} &= \tau_{2,verre}
 \end{aligned} \tag{IV.3}$$

De la même manière que pour le coefficient de transmission du verre, les coefficients d'absorption α_1 du tedlar (identique sur ses deux faces) et de transmission τ_1 du silicium sont liés à au moins un autre paramètre radiatif décrivant leur matériau, tel que :

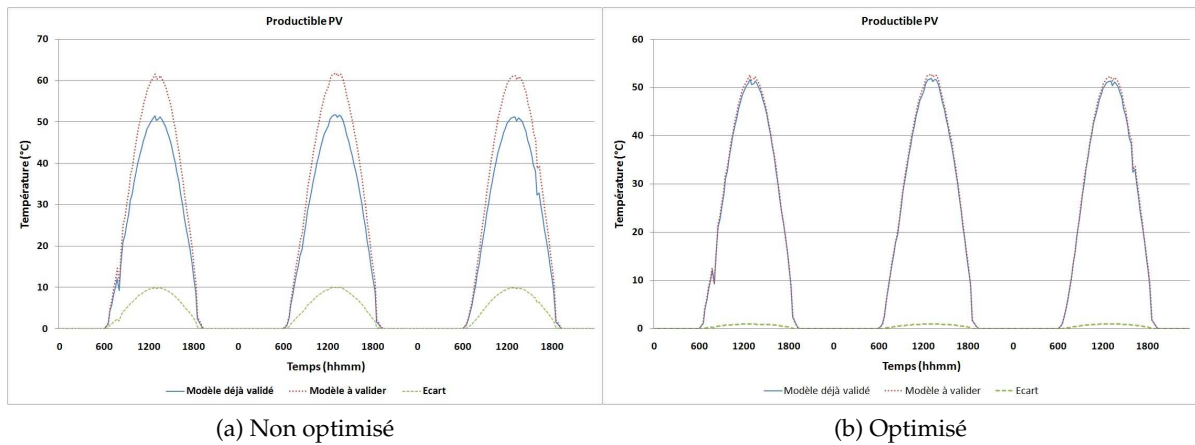


FIGURE IV.29 : Comparaisons des résultats obtenus sur le productible PV de l'ISOTEST 2 avant et après optimisation.

$$\begin{aligned}
 \tau_{1,\text{silicium}} &= 0,94 - \rho_{1,\text{silicium}} \\
 \tau_{2,\text{silicium}} &= 0,94 - \rho_{2,\text{silicium}} \\
 \alpha_{1,\text{silicium}} &= \alpha_{2,\text{silicium}} = 0,05 \\
 \alpha_{1,\text{tedlar}} &= 1 - \rho_{1,\text{tedlar}} \\
 \alpha_{2,\text{tedlar}} &= 1 - \rho_{2,\text{tedlar}}
 \end{aligned}
 \tag{IV.4}$$

L'optimisation lancée à partir de ces hypothèses a permis d'améliorer le modèle du point de vue de la prédiction du productible PV (cf Figure IV.29. Les valeurs des paramètres avant et après optimisation sont présentées dans le tableau Tableau IV.12 p.143.

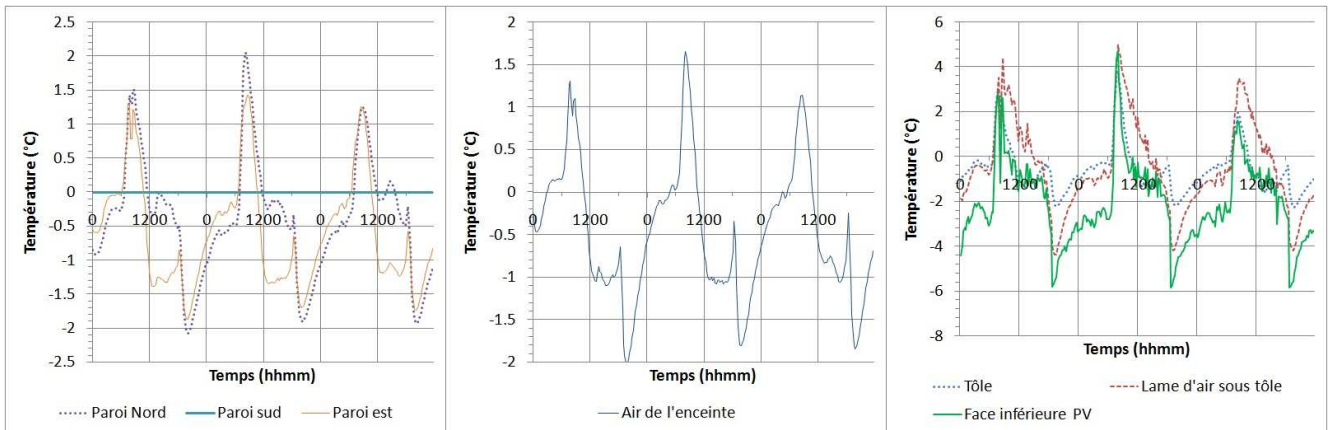


FIGURE IV.30 : Comparaisons des résultats obtenus sur les écarts des températures des éléments de la cellule ISOTEST 2 après optimisation.

L'erreur entre les résultats de simulation et les mesures sur le productible photovoltaïque passe de 15,54% avant optimisation à 1,83% après optimisation. Cependant, sur la Figure IV.30, on constate que les écarts modèle/mesure sur les températures des éléments du bâtiment restent approximativement les mêmes, l'écart le plus important se situant toujours sur la température de face inférieure du panneau photovoltaïque. Cependant, on constate une amélioration de la prédiction des températures des éléments de la toiture PV durant les heures les plus chaudes de la journée. Comme expliqué auparavant lors de

la validation du modèle de la cellule de référence, les pics d'écart observables sur la Figure IV.30 sont dûs à un décalage entre la mesure du flux solaire incident faite par la station météorologique et le flux effectivement incident aux ISOTEST. C'est un nouvel exemple de ce que peuvent engendrer les masques sur une séquence de validation expérimentale en environnement non contrôlé.

Ceci est confirmé par l'observation de la Figure IV.31, qui présente l'erreur obtenue sur la température de la face inférieure PV de l'ISOTEST 2 après optimisation, erreur la plus grande de celles des différents éléments du bâtiment. L'erreur reste bien en dessous des 10% fixés par la limite de validation. Pendant les heures les plus chaudes et les heures les plus froides, elle a tendance à diminuer passant même en dessous de 5%. Les écarts-types, les écarts maximum et les erreurs associées à chaque élément du bâtiment sont présentés dans le Tableau IV.11.

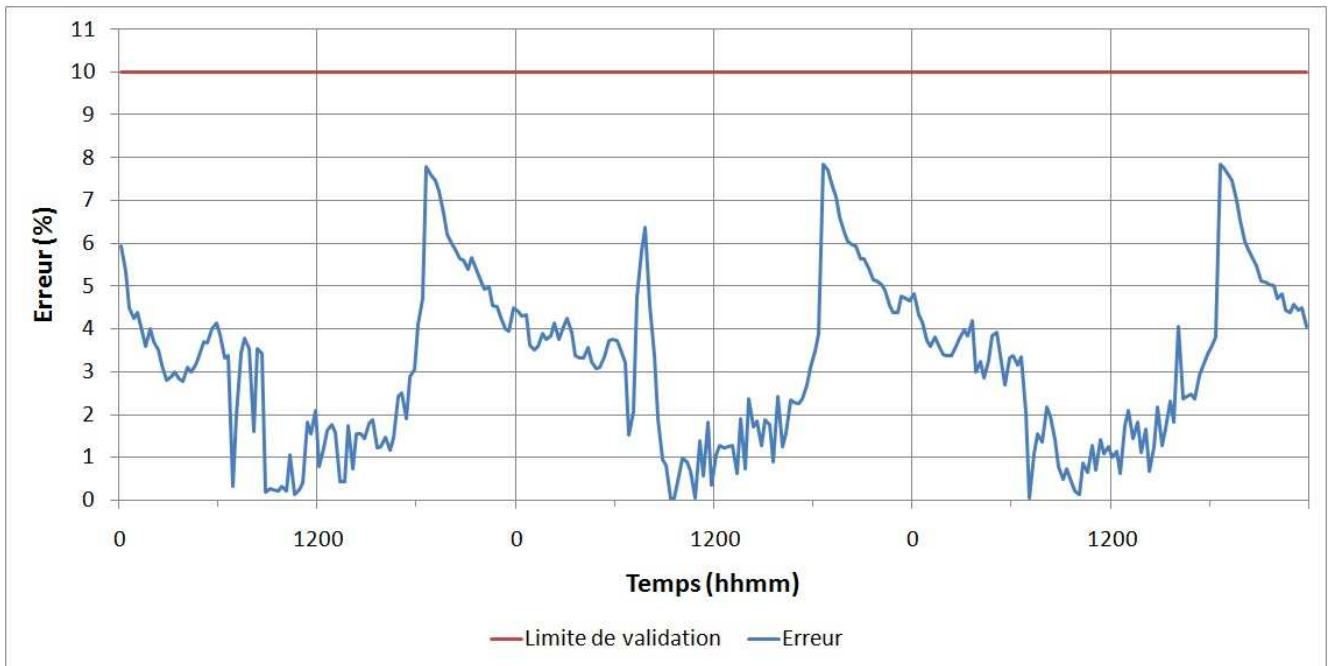


FIGURE IV.31 : Tracé de l'erreur sur la température de face inférieure PV de l'ISOTEST 2 après optimisation.

Emplacement	Ecart-type σ (°C ou W)	Ecart maximum (°C ou W)	Erreur (%)
Paroi nord	1,26	-3,56	5,48
Paroi est	1,23	-3,42	4,88
Air de l'enceinte	1,10	-3,63	8,16
Lame d'air sous tôle	2,73	5	8,07
Tôle	1,46	3,84	6,3
Lame d'air sous PV	1,42	-6,83	9,72
Face inférieure PV	2,42	-10	13,46
Productible PV	0,34	0,95	1,73

Tableau IV.11 : Écarts-types, écarts maximum et erreurs après validation du modèle pour la cellule ISOTEST 2.

En s'appuyant sur ces informations et sur les objectifs du code de simulation, à savoir modéliser l'impact d'une installation PV sur le confort thermique et estimer le productible PV, le modèle peut être considéré correct. Car les erreurs maximales engendrées, qui invalident le modèle, n'entrent pas dans

les périodes critiques de la journée où elles peuvent poser problème en terme d'estimation du confort (pendant les heures chaudes le jour et pendant les heures froides la nuit) ou du productible PV (pendant les heures les chaudes).

Paramètres	Valeur estimée avant optimisation	Valeur estimée après optimisation
h_{ce} toiture	Modèle de Sturrock	Modèle Tourrock
α_{ext} toiture	0,98	0,76
τ du verre	0,85	0,68
ρ du verre	0,1	0,27
α du tedlar	0,3	0,44
τ du silicium	0,77	0,74
h_c lame d'air sous PV	Calculée (IUT)	Calculée (Sturrock)

Tableau IV.12 : Paramètres et leurs valeurs avant et après optimisation pour la cellule ISOTEST 2

Enfin, dans le Tableau IV.12, les paramètres qui ont causé le plus de soucis lors de la modélisation sont bien les paramètres radiatifs. Une identification exacte de tous les paramètres physiques nécessaires à la description du fonctionnement d'un système est essentielle. La solution utilisée ici permet d'approcher un jeu de paramètres réalistes, mais il serait difficile de vérifier l'exactitude de ce genre de paramètre optique de par la difficulté de mise en œuvre des systèmes de mesures adéquates. La meilleure solution reste encore la donnée du constructeur si celui-ci la communique et s'il a été capable de la mesurer.

Pour s'assurer de la validation du modèle de bâtiment BIPV avec lame d'air confinée sous le panneau PV, il reste encore à procéder à une étape de corroboration de celui-ci sur une autre période.

IV.D.2 Corroboration des résultats pour le modèle de la cellule ISOTEST 2

Dans cette phase de corroboration, le fichier météorologique est celui des 27 et 28 Février 2009 comme pour la corroboration du bâtiment simple.

Les Figure IV.32, Figure IV.33, Figure IV.34 et Figure IV.35 présentent les résultats de la corroboration. Comme on peut le constater, la dynamique est toujours respectée. En revanche, les écarts modèles/mesures sont légèrement plus importants en ce qui concerne les parois verticales et l'air de l'enceinte du bâtiment. Cela peut être dû à un « calage » trop important des paramètres pour des conditions environnementales spécifiques. Cependant, malgré des écarts plus importants, le modèle peut être validé avec des erreurs inférieures à 10% de l'amplitude maximale de la mesure et des écarts types du même ordre que lors de l'étape de validation soit environ 1°C (cf Tableau IV.6 p.144).

Le modèle de bâtiment simple vient donc d'être validé et corroboré. La suite de ce chapitre va maintenant se consacrer à valider le modèle de bâtiment équipé de panneau(x) photovoltaïque(s) installé(s) en toiture.

La validation du modèle de bâtiment BIPV a donc été possible pour le cas où la lame d'air sous le panneau est confinée. Il reste donc à reproduire la démarche sur la cellule où la lame d'air sous PV est ouverte, c'est-à-dire le modèle de la cellule ISOTEST 3.

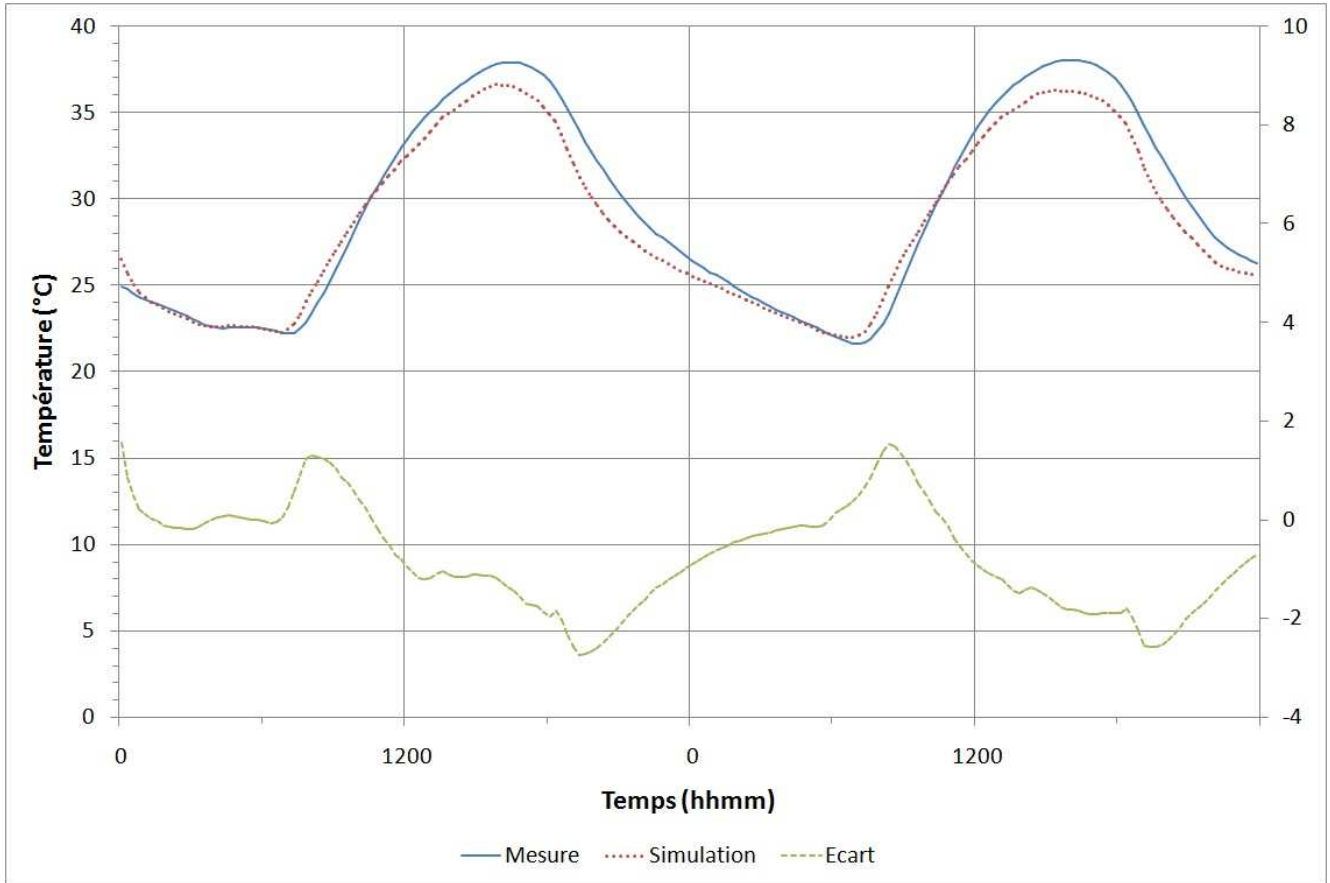


FIGURE IV.32 : Comparaison modèle/mesures pour l’air de l’enceinte de la cellule ISOTEST 2 lors de la phase de corroboration.

Emplacement de la mesure	Ecart-type σ (°C ou W)	Ecart maximum (°C ou W)	Erreur (%)
Paroi nord	1,07	-2,48	6,71
Paroi est	1,55	-3,51	8,94
Air de l’enceinte	1,06	-2,73	7,17
Lame d’air sous tôle	2,73	5	8,07
Tôle	1,18	-2,68	5,06
Lame d’air sous PV	1,70	-5,39	8,75
Face inférieure PV	2,12	-3,88	6,24
Productible PV	0,35	0,86	1,70

Tableau IV.13 : Écarts-types et écarts maximum de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 2 lors de la phase de corroboration.

IV.D.3 Validation de la cellule ISOTEST 3

Commençons cette sous-partie par rappeler que la cellule ISOTEST 3 est celle dont la lame d’air sous panneau PV est ouverte. Ceci implique des phénomènes convectifs différents par rapport à la cellule ISOTEST 2. En effet, la convection à l’intérieur de la lame d’air peut-être induite soit par le vent, soit par une convection naturelle entraînant un débit d’air à travers la lame d’air. Dans les deux cas, ce

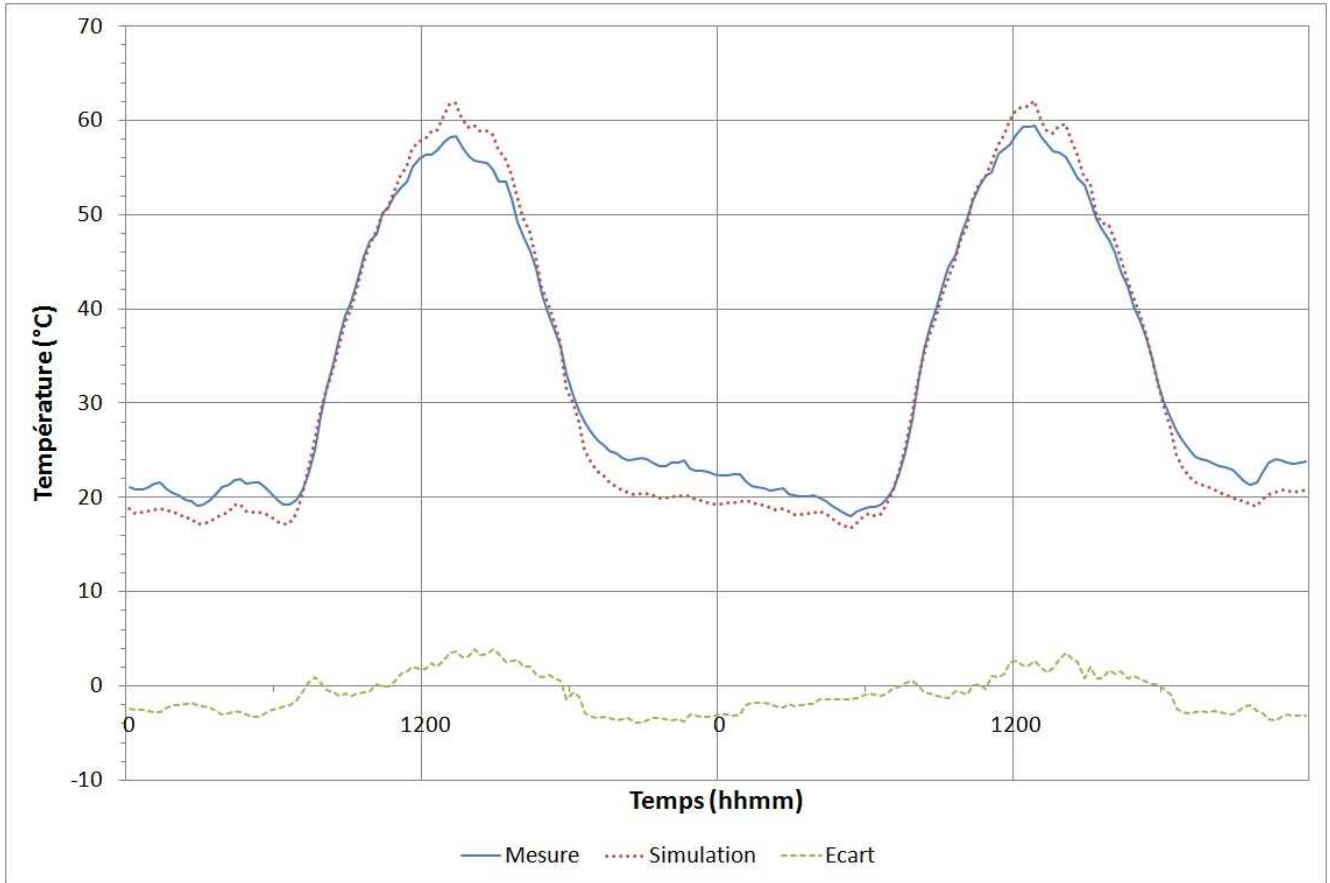


FIGURE IV.33 : Comparaison modèle/mesures pour la température de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 2 lors de la phase de corroboration.

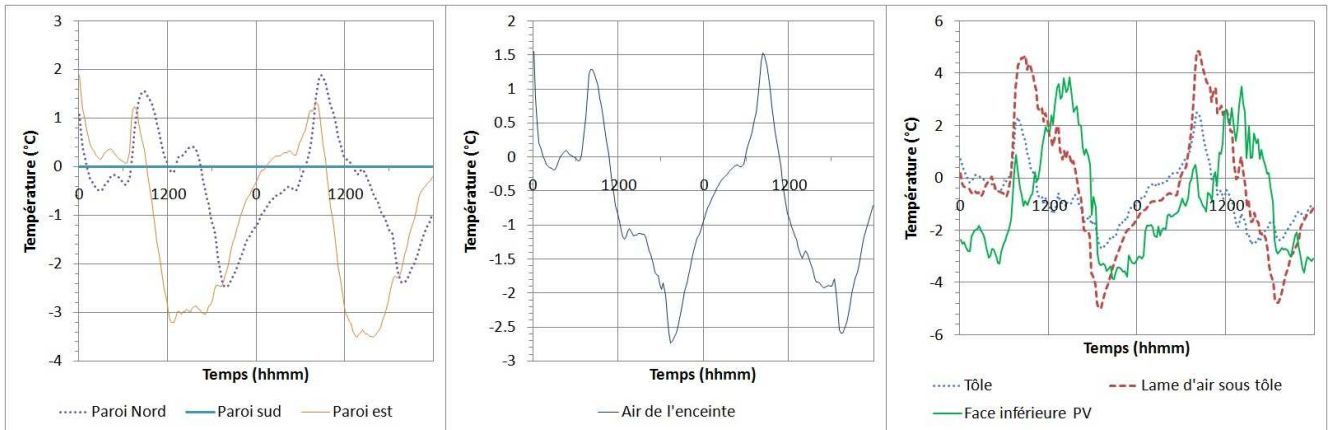


FIGURE IV.34 : Écarts modèle/mesures pour l'ensemble des éléments de la cellule ISOTEST 2 lors de la phase de corroboration.

débit d'air va influencer sur les échanges convectifs en modifiant le bilan de nœud d'air. Dans le cas de la convection induite par le vent, nous avons considéré qu'une vitesse d'air était « forcée » dans la lame d'air et fonction de la vitesse du vent (cf Chapitre II). De plus, nous avons fait l'hypothèse de considérer, dans un premier temps, que l'effet du vent était prédominant sur la convection naturelle en lame d'air ouverte. Les résultats présentés ci-après permettront de valider ou d'invalidier cette hypothèse, ainsi que

le modèle de la cellule ISOTEST 3.

En reprenant la démarche de validation et la proposition d'étude présentées auparavant, les caractéristiques validées du modèle de la cellule ISOTEST 2 sont reportées à la cellule 3, en spécifiant cependant que la lame d'air est une lame d'air ouverte sur le milieu extérieur. Les sorties du modèle qui sont étudiées sont les mêmes que celles de la validation de la cellule 2.

IV.D.3.a Confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 3

Cette confrontation aboutit aux Figure IV.36, Figure IV.37 et Figure IV.38, représentant respectivement les résultats de la confrontation sur le productible PV et sur les températures des différents éléments étudiés. Sur la Figure IV.37, le productible PV est visiblement correctement estimé avec une erreur légèrement plus grande que celle obtenue lors de la validation précédente (soit 2,52% contre 1,73%).

La Figure IV.36 montre que les températures de la toiture PV sont mal modélisées. L'erreur semble venir principalement de la lame d'air sous PV. La différence entre le modèle avec lame d'air ouverte et lame d'air confinée n'étant que la distinction du type de lame d'air, il semble évident que le problème de modélisation vient de la description des phénomènes convectifs en lame d'air ouverte.

De plus, ces écarts sont bien plus marqués le jour, atteignant des pics de plus de 25°C d'écart. Cela induit qu'un effet particulier apparaît après le lever du soleil. Cet effet ne peut être que la convection naturelle engendrée à l'intérieur de la lame d'air suite au réchauffement des éléments de la toiture PV. Il semble en effet que le modèle de ventilation choisi ne soit plus suffisamment efficace pour représenter la température de la lame d'air entre 9h et 10h, lorsque l'échauffement de la toiture devient trop important. Le moment où le modèle n'est plus adéquat correspond au moment où la convection naturelle dans la lame d'air prend le pas sur la convection forcée engendrée par le vent.

Après vérification des coefficients d'échange convectifs et des vitesses d'air calculés au sein de la lame d'air ouverte, cela se confirme. En effet, des coefficients d'échange convectifs aberrants sont calculés (de l'ordre de $3000 \text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Les résultats de l'analyse de sensibilité présentés par la suite

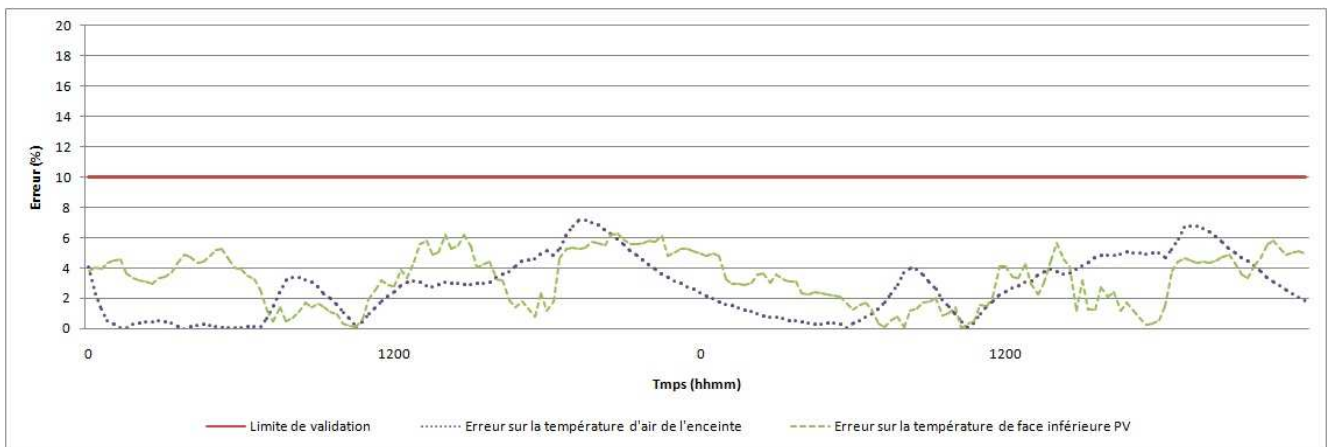


FIGURE IV.35 : Erreurs modèle/mesures pour les températures d'air d'enceinte et de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 2 lors de la phase de corroboration.

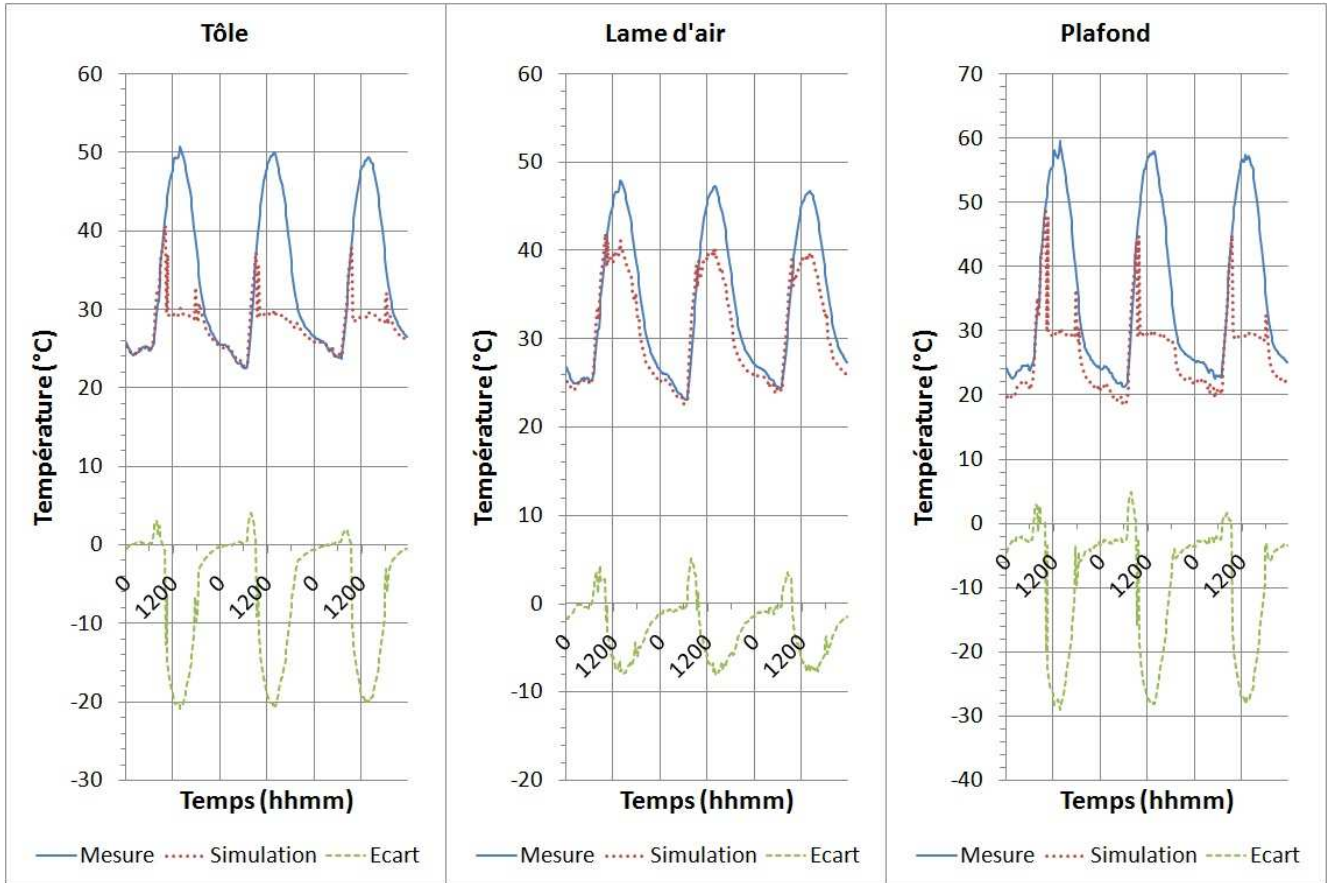


FIGURE IV.36 : Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour les éléments de la toiture PV de la cellule ISOTEST 3.

confirment ces observations. Ces flux aberrants proviennent d’une erreur de prise en compte de l’effet de la vitesse du vent, vitesse qui augmente généralement pendant la journée sur les périodes étudiées, et sur une modélisation inadéquate des phénomènes convectifs, qui n’intègre pas de modèles de convection naturelle.

Rappel : Le modèle de convection naturelle n’a pas été intégré, car aucun modèle existant ne permettait de décrire le type de lame d’air voulu. Pour modéliser ce genre de problème convectif, il est possible de faire appel à des codes CFD, mais il ne pourrait alors répondre aux objectifs de rapidité du code de simulation ISOLAB.

IV.D.3.b Analyse de sensibilité du modèle de la cellule ISOTEST 3

Les Figure IV.39 et Figure IV.40 présentent les résultats de l’analyse de sensibilité du modèle de la cellule ISOTEST 3. Sur la Figure IV.39, il est constaté que les paramètres suivants sont les plus influents :

- 236 : le coefficient d’échange convectif au sein de la lame d’air le jour ;
- 247 : la vitesse d’écoulement dans la lame d’air le jour.

Remarque : Dans le code, la vitesse d’écoulement du fluide dans la lame d’air permet de connaître le débit circulant dans la conduite. Ce débit est ensuite intégré dans l’équation bilan du nœud d’air de la

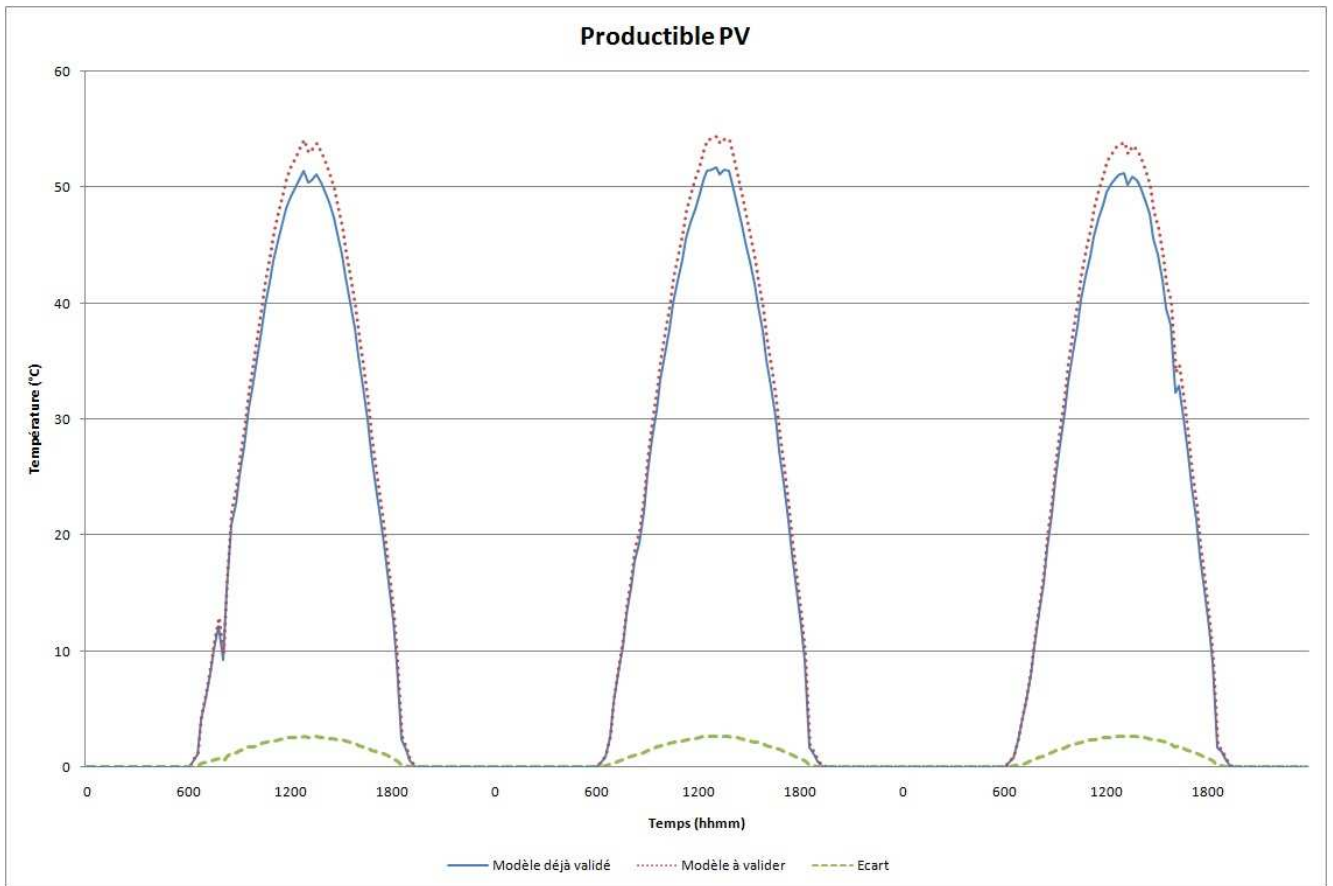


FIGURE IV.37 : Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour le productible photovoltaïque de la cellule ISOTEST 3.

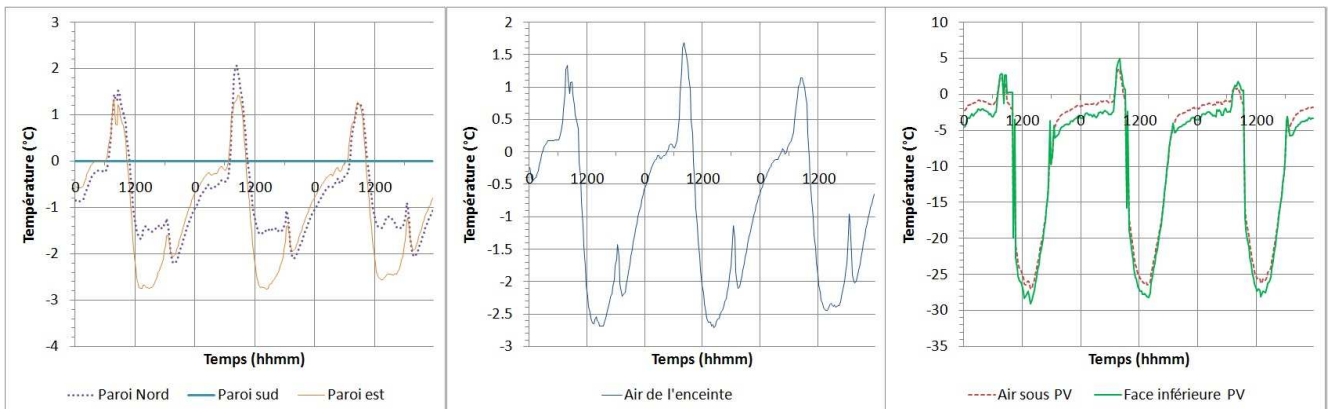


FIGURE IV.38 : Écarts modèle/mesure pour les températures des différents éléments de la cellule ISOTEST 3.

lame d'air. Tout comme les coefficients d'échanges convectifs, il est nécessaire de moyenner cette vitesse afin de l'intégrer dans la description du bâtiment qui sera utilisée pour l'analyse de sensibilité.

Les effets principaux observables sur la Figure IV.40 confirment l'hypothèse faite plus tôt que les paramètres convectifs de la lame d'air ont un effet très important sur le calcul de la température de la lame d'air. De plus, d'autres paramètres qui apparaissent dans l'analyse de sensibilité de la lame d'air

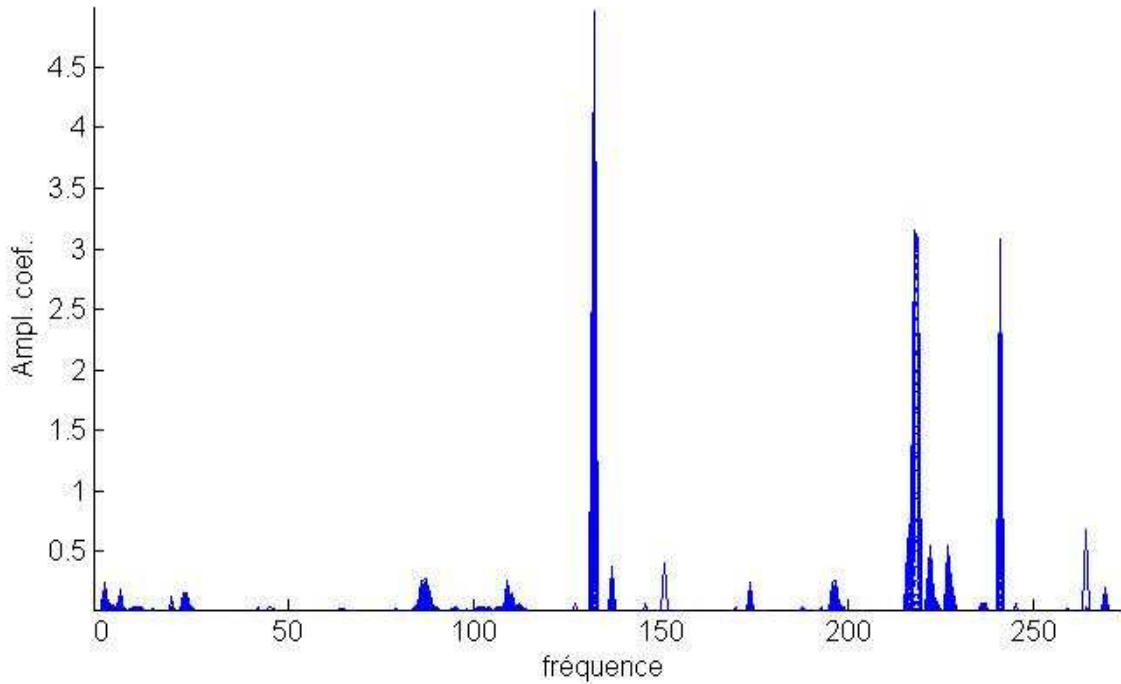


FIGURE IV.39 : Spectre de Fourier obtenu par rapport à la température de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 3.

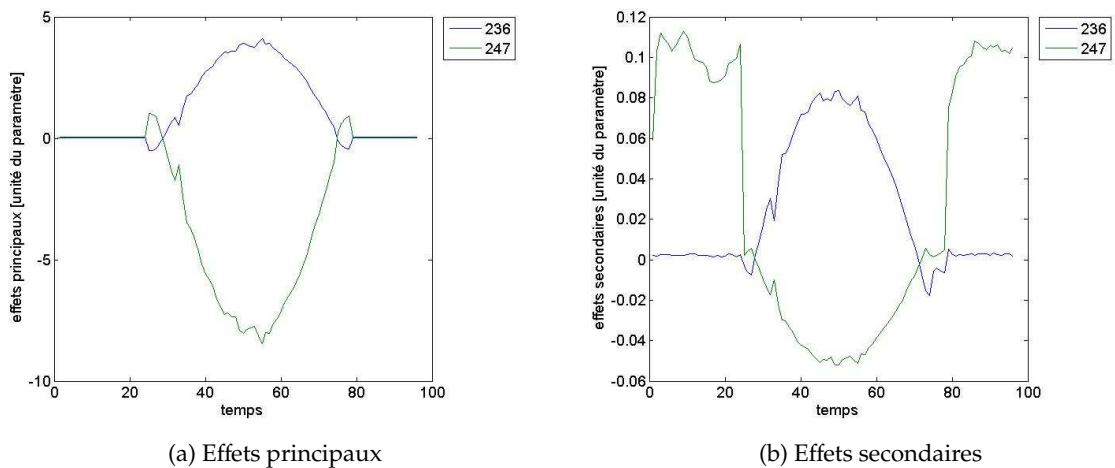


FIGURE IV.40 : Effets des paramètres sur la température de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 3.

confinée de la cellule ISOTEST 2 n'apparaissent plus. Pourtant, ces paramètres (azimut de la toiture, absorption du tedlar, etc.) devraient avoir un effet tout aussi important dans cette analyse. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'effet de la valeur moyennée du coefficient d'échange convectif (environ $3000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) réduit l'importance des autres effets des autres paramètres. En revanche la vitesse d'écoulement dans la lame d'air est liée au coefficient d'échange convectif par l'intermédiaire du bilan de flux du nœud d'air, et c'est pourquoi elle apparait.

Il semble que la vitesse d'écoulement dans la conduite soit mal calculée, et entraîne alors une mauvaise estimation du coefficient d'échange convectif. Ceci est probablement dû au fait que l'effet du vent à l'extérieur sur l'écoulement à l'intérieur de la conduite est bien moindre que ce qui a été envisagé de prime abord. Peut-être la convection naturelle prend elle le pas sur l'effet du vent. Ceci pourra être confirmé ou pas par la suite grâce à l'étape d'optimisation.

IV.D.4 Optimisation du modèle de la cellule ISOTEST 3

Cette dernière séquence d'optimisation concerne donc l'optimisation des paramètres convectifs de la lame d'air ouverte sous le panneau PV. Deux paramètres sont étudiés : le coefficient d'échange convectif moyen de la lame d'air et la vitesse d'écoulement du fluide.

Le meilleur couple de paramètres obtenu à la fin de l'optimisation correspond à une vitesse d'écoulement nulle, et un coefficient d'échange convectif d'environ $16,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Les résultats de cette optimisation sont présentés sur les Figure IV.41 et Figure IV.42.

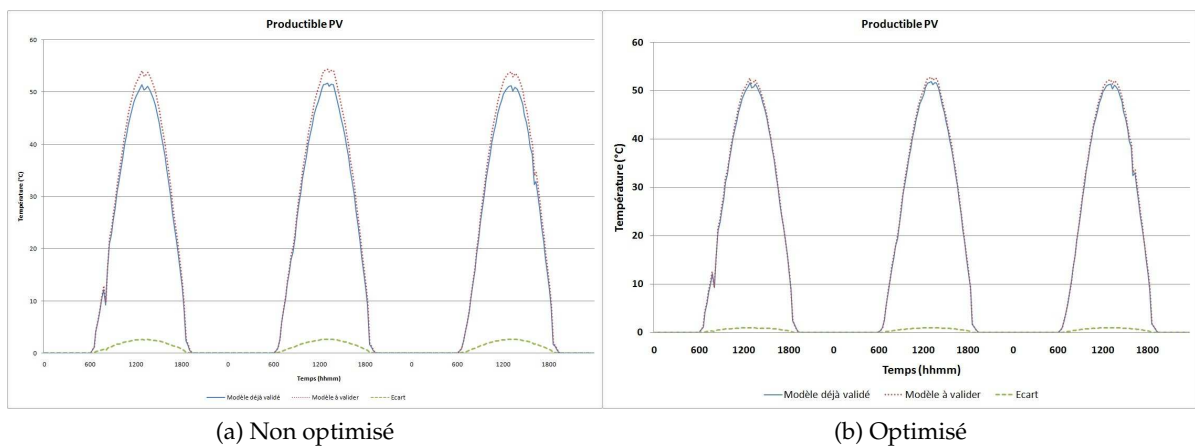


FIGURE IV.41 : Comparaisons des résultats obtenus sur le productible PV de l'ISOTEST 3 avant et après optimisation.

La Figure IV.41 montre que le productible PV est toujours aussi bien voir mieux modélisé qu'avant la séquence d'optimisation. En revanche, la Figure IV.42 montre une nette amélioration au niveau des écarts modèles/mesures au terme de l'optimisation. Les écarts-types, écarts maximum et erreurs de modélisation des différents éléments de la cellule ISOTEST 3 sont présentés dans le Tableau IV.14.

De plus, même si l'optimisation du coefficient d'échange convectif permet d'obtenir des résultats satisfaisants, la valeur trouvée peut difficilement être utilisée pour d'autres cas. En effet, cette valeur est fonction des propriétés du système (différence de température entre fluide et paroi, dimensions de lame d'air, inclinaison, etc.) et est propre à la configuration des cellules ISOTEST sur la période étudiée. Dans le meilleur des cas, il faudrait réussir à créer un nouveau modèle pour ce type de lame d'air fine.

Pour cela, des améliorations devront être faites à l'avenir au niveau de la modélisation des lames d'air ouvertes. Le projet PVbat, qui a fait l'objet d'une demande de financement en 2011 et a été labellisé par le pôle de compétitivité Capenergies (cf Annexes - Partie E en annexes p.186), a justement été

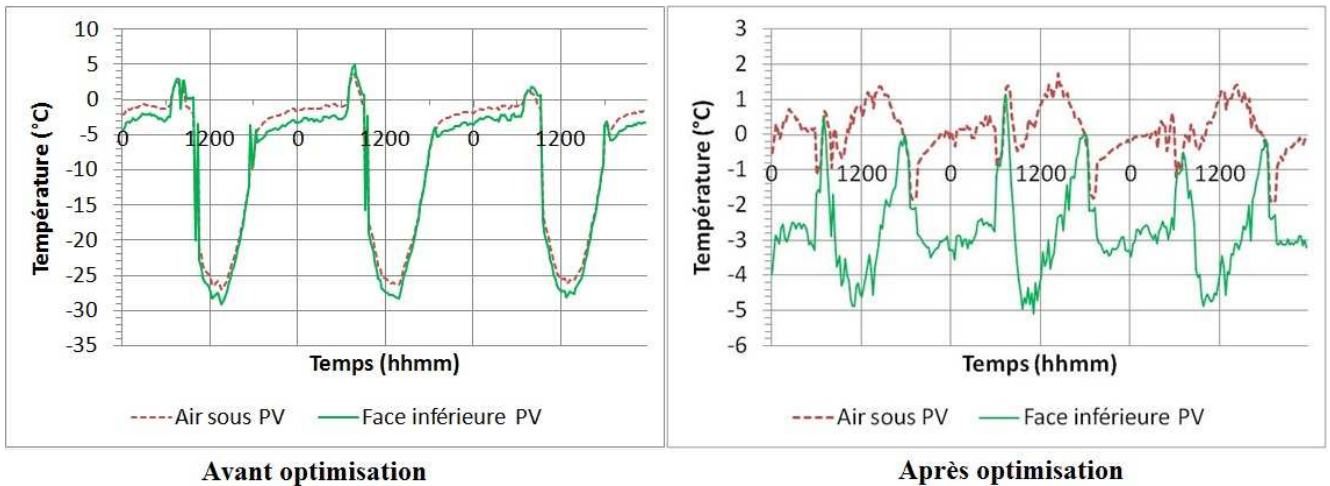


FIGURE IV.42 : Écarts modèle/mesures obtenus sur les températures d’air sous PV et de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 3 avant et après optimisation.

lancé au cours de cette thèse dans ce but : mettre en place une nouvelle expérimentation permettant de mieux comprendre les phénomènes convectifs entrant en jeu dans les configurations de lame d’air ouvertes. Dans l’hypothèse d’un financement, une expérimentation sera montée dans le but d’expérimenter une grande variété de configurations de lame d’air (inclinaison, épaisseur, longueur, type d’ouverture, etc.). Elle offrira la possibilité de prendre des mesures supplémentaires au niveau des lames d’air, telles que les vitesses d’écoulement, mais aussi la possibilité de contrôler la vitesse d’air dans la lame d’air par l’utilisation d’une Ventilation Mécanique Contrôlée.

Cette dernière expérimentation ne participera peut-être pas à l’amélioration des modèles des cellules ISOTEST, car elle se déroulera sur un bâtiment de plus grande échelle (échelle 1). Mais les résultats obtenus sur les cellules à échelles réduites risquent également d’apparaître à de plus grandes échelles, et ce type d’expérimentation permettra alors d’assurer une plus grande fiabilité des mesures, ainsi qu’une plus grande palette de données pour les études de validation et d’optimisation de modèle.

Emplacement	Ecart-type σ (°C ou W)	Ecart maximum (°C ou W)	Erreur (%)
Paroi nord	1,26	-3,56	8,09
Paroi est	1,23	-3,42	7,76
Air de l’enceinte	1,10	-3,63	8,14
Lame d’air sous tôle	2,02	5	8,07
Tôle	1,46	5,73	9,03
Lame d’air sous PV	1,42	-6,83	9,72
Face inférieure PV	2,42	-10	13,46
Productible PV	0,34	0,95	1,73

Tableau IV.14 : Écarts-types, écarts maximum et erreurs après validation du modèle pour la cellule ISOTEST 3.

Pour consolider un peu plus la validation, le tracé de l’erreur des températures de face inférieure PV et d’air d’enceinte, présenté sur la Figure IV.43, montre que ces deux critères essentiels dans les estimations du productible PV et du confort sont validés à bien moins de 10%. Le productible PV est encore en dessous avec une erreur maximale de 5% (cf Tableau IV.14).

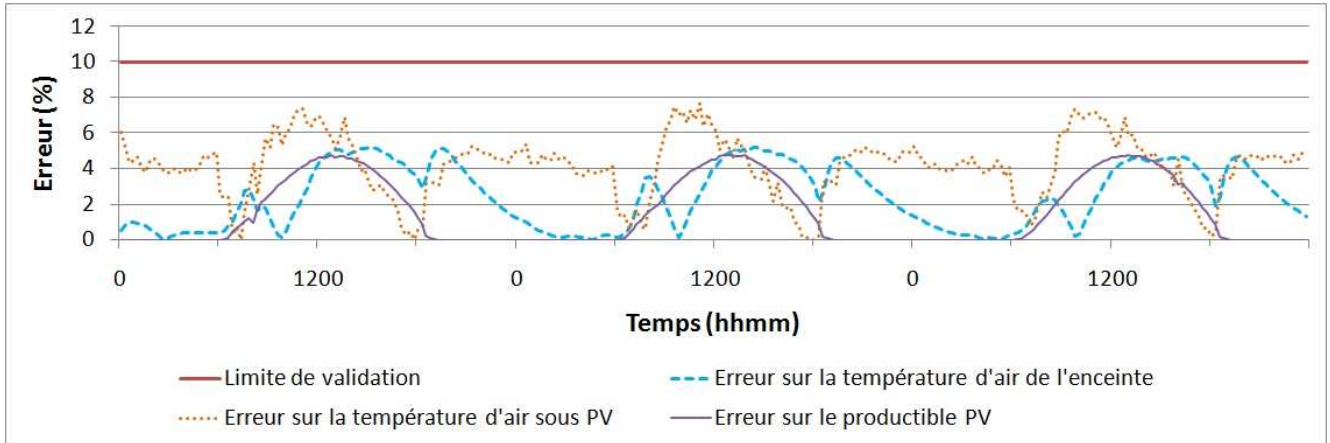


FIGURE IV.43 : Écarts modèle/mesures obtenus sur les températures d'air sous PV et de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 3 avant et après optimisation.

Enfin, comme nous l'avons remarqué, l'optimisation qui a été faite dans cette sous partie sur le coefficient d'échange convectif de la lame d'air sous PV n'est valable que pour des conditions environnementales similaires. Une corroboration des résultats n'a donc pas de sens. Il serait préférable de procéder à une étude plus approfondie de ce type de lame d'air à l'avenir et éprouver le modèle à l'aide d'une ou plusieurs autres expérimentations.

Ainsi se termine la partie traitant de la validation des modèles de bâtiments intégrant des lames d'air en toiture. La prochaine et dernière partie de ce chapitre va s'intéresser à l'étude d'un bâtiment réel.

IV.E ÉTUDE DE CAS : UN BÂTIMENT À ÉCHELLE 1, LA CELLULE LGI

Cette étude de cas a pour objectif de donner un aperçu des nouvelles capacités du code de calcul ISOLAB. Une étude de l'impact de l'installation photovoltaïque sur le confort d'un bâtiment va être menée. Cette étude fait écho au projet cité auparavant dans cette thèse, le projet PVbat. Ce projet a pour objectif de déterminer la performance thermique d'un panneau photovoltaïque installé en toiture.

Pour ce faire, il doit atteindre plusieurs objectifs :

- Les performances thermiques : pouvoir d'isolation à travers une résistance thermique équivalente ;
- Les performances électriques d'un système photovoltaïque intégré en toiture : productible PV ;
- L'impact du système sur le bâtiment : confort thermique ;
- L'influence des paramètres (épaisseur de la lame d'air, inclinaison du panneau, etc.) : optimiser l'installation photovoltaïque.

Le projet est un partenariat entre le laboratoire PIMENT et le Groupe Dijoux. Il a été labellisé par le pôle de compétitivité Capénergies et est actuellement en recherche de financement. Il comporte trois phases principales :

1. une phase de modélisation des complexes photovoltaïque de toitures et d'étude numérique des systèmes ;
2. une phase d'étude expérimentale des systèmes PV en toiture ;
3. une phase de création d'un outil à destination des maîtres d'œuvres.

Nous proposons, dans l'étude de cas présentée ici, une partie de l'étude numérique du projet PVbat, en prévision des futures études expérimentales. Pour ce faire nous présentons le support expérimental qu'est la cellule LGI, une analyse de confort graphique, et un tracé des indices de vote moyens (PMV) décrivant le confort et permettant de savoir si il est atteint.

La cellule LGI (cf Figure IV.45) est un bâtiment de plein pied approximativement de forme cubique de 3m de côté, d'échelle 1, installée sur la plate-forme expérimentale du laboratoire PIMENT. Elle a déjà été à plusieurs reprises utilisée pour l'étude de complexes de toiture.



FIGURE IV.44 : Vue de la plateforme expérimentale avec la LGI à droite.

Pour les besoins de cette étude, deux cas seront présentés :

1. le cas où la cellule est dans sa configuration de référence (sans panneau PV ni isolation thermique) ;
2. et le cas où la toiture est entièrement recouverte de panneaux PV.

La cellule LGI est située près de la côte (altitude 0) et est supposée subir un climat tropical d'été, caractérisé par un fort rayonnement solaire et des vitesses de vent faibles. Une autre caractéristique importante du climat influençant le confort thermique est l'humidité relative, qui atteint des valeurs élevées à La Réunion.

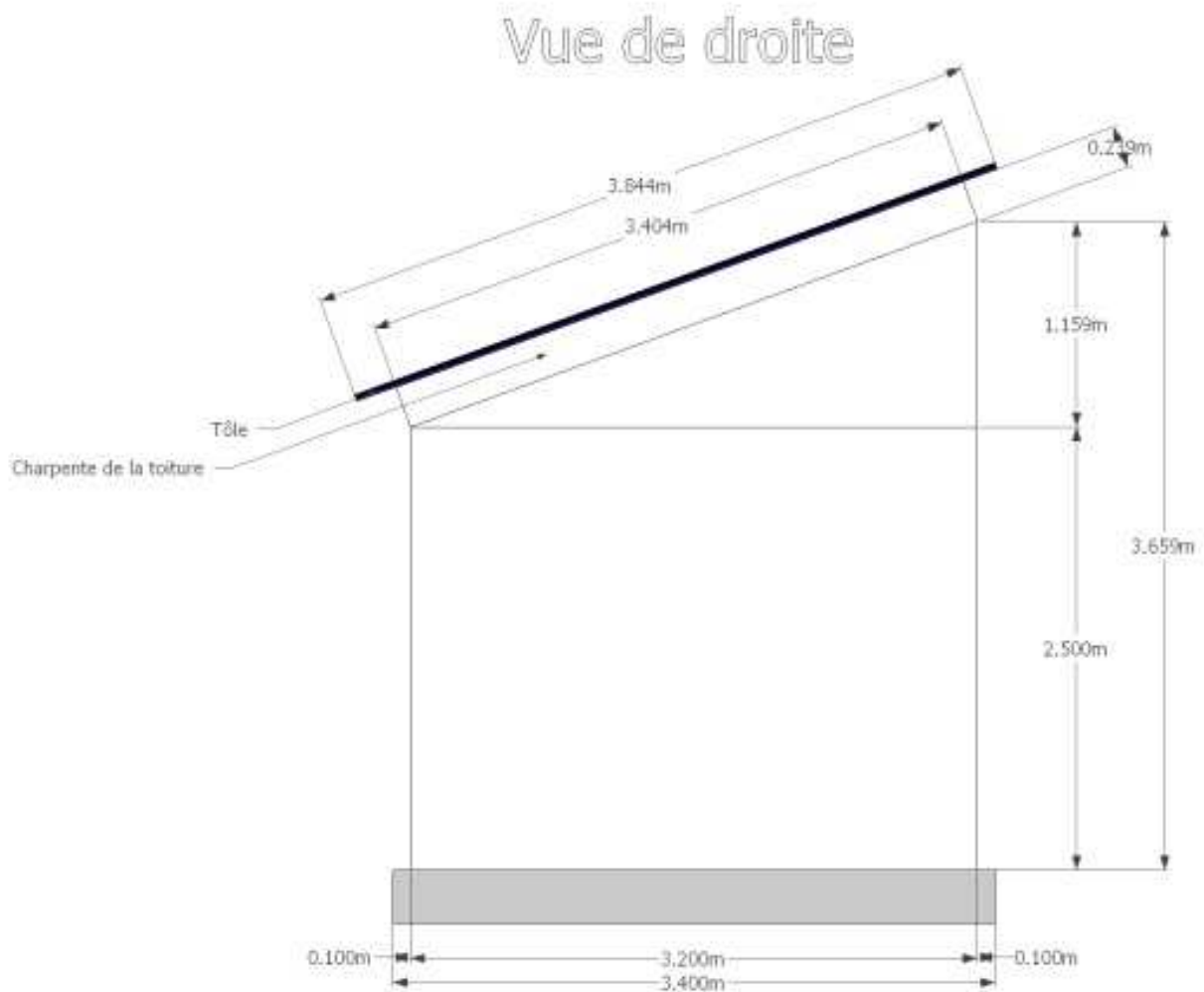


FIGURE IV.45 : Vue d edroite de la LGI sans panneau PV.

Les Figure IV.45 et Figure IV.46 présentent respectivement une vue de profil de la cellule ainsi qu'une vue où elle serait équipée de paneneaux PV.

L'étude va donc consister à modéliser le bâtiment tout d'abord sans installation photovoltaïque, puis avec installation photovoltaïque, et comparer les résultats des simulations en termes de confort thermique de l'occupant. Le fichier météo utilisé pour lancer les simulations est celui du mois de Janvier 2009.

Le même bâtiment équipé de panneaux PV n'existe pas encore, les résultats présentés ne sont qu'une prédiction de l'impact que pourrait avoir une installation photovoltaïque sur le bâtiment.

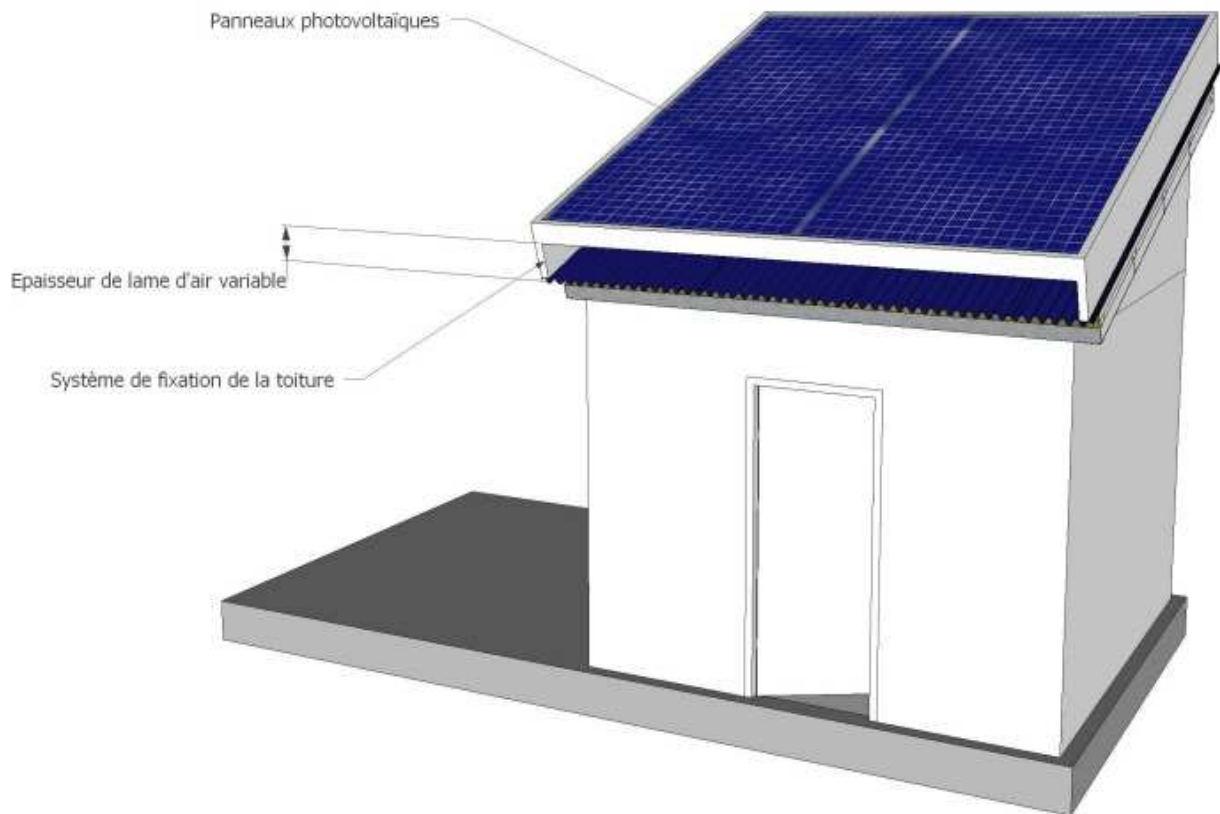


FIGURE IV.46 : Vue de la LGI équipée de panneaux PV.

Nous faisons l'hypothèse que toute la toiture du bâtiment est équipée de panneaux photovoltaïques. De plus, les panneaux dont nous avons validé les modèles auparavant, c'est-à-dire les panneaux de type KYOCERA KC 65, sont supposés être utilisés.

Le but de cet étude étant de mettre en évidence l'impact de l'installation PV sur le confort thermique du bâtiment, celui du bâtiment sans installation PV est tout d'abord évalué. En utilisant le module de confort thermique déjà intégré à ISOLAB, nous obtenons la Figure IV.47.

En observant Figure IV.47, nous constatons que nous sommes en situation d'inconfort toute la journée avec des températures élevées. Le matin, il serait possible d'améliorer la situation en créant une circulation d'air de 1 ou 2 $m.s^{-1}$ en fonction de l'heure de la journée, mais ce n'est pas possible pour le reste de la journée. Ici, la toiture en béton armé absorbe le rayonnement solaire, l'emmagasine sous forme de chaleur, et la restitue tout au long de la journée.

Deux classes de méthodes existent pour améliorer le confort dans ces conditions. La première, une méthode active, consiste à compenser la chaleur en utilisant un système de climatisation de l'air, mais cette méthode est coûteuse en énergie, et donc néfaste pour l'environnement. Elle ne doit être utilisée qu'en dernier recours.

La seconde méthode, une méthode passive, consiste à améliorer les propriétés isolantes du bâtiment

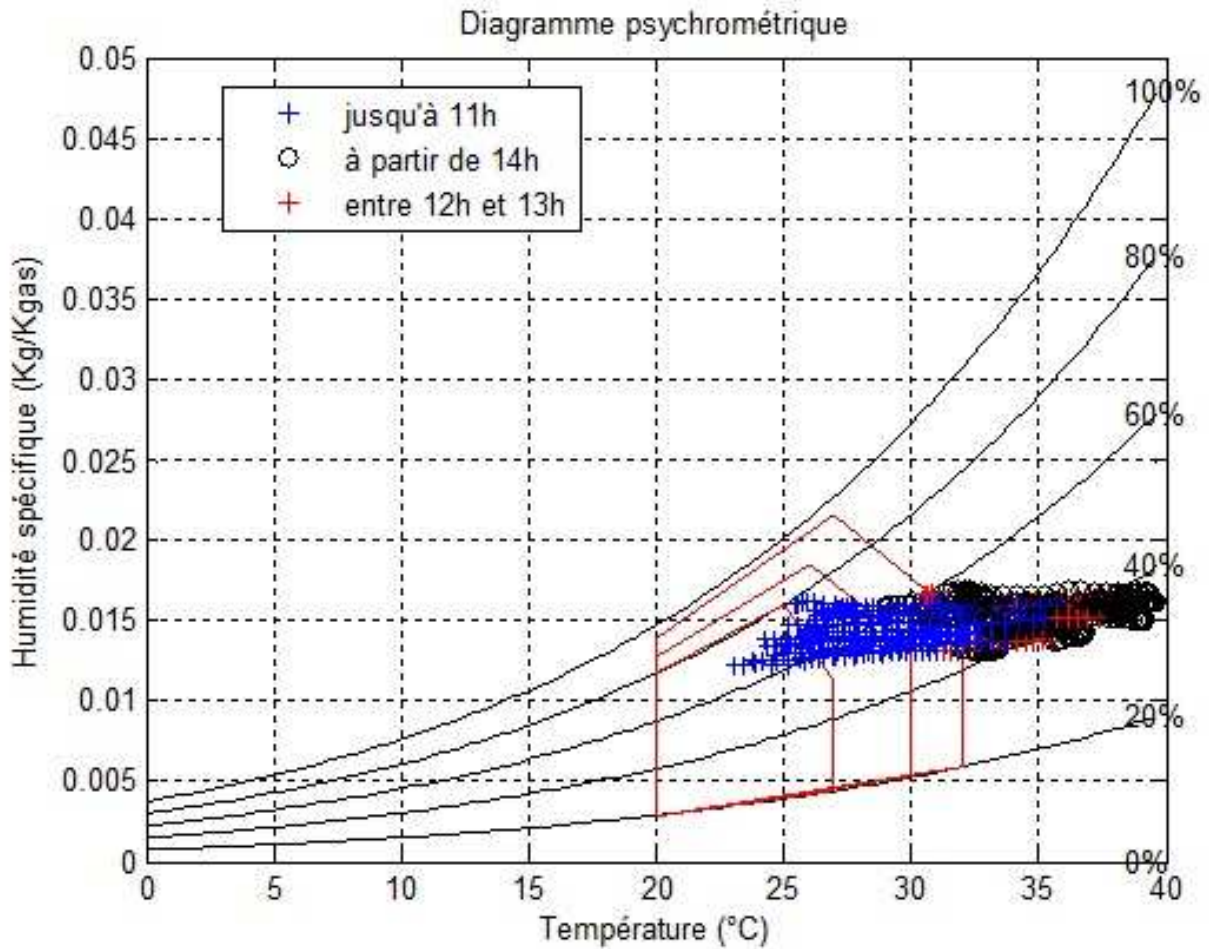


FIGURE IV.47 : Diagramme de confort du bâtiment non équipé de panneaux photovoltaïques.

en lui ajoutant des matériaux capables de limiter les apports de chaleur lorsqu'il y en a trop (ou de limiter les pertes de chaleur lorsque le but est de chauffer le bâtiment).

L'installation photovoltaïque va donc s'insérer dans cette classe de méthodes et sera alors considérée comme un système de protection solaire du bâtiment. Le terme de système passif en ce qui concerne l'isolation du bâtiment sera alors utilisé, mais celui de système actif en ce qui concerne la production d'électricité.

En étudiant le confort obtenu grâce à l'installation photovoltaïque avec lame d'air ouverte, le diagramme de confort de la Figure IV.48 est obtenu.

L'amélioration du confort thermique est visible graphiquement. Cependant cela ne suffit pas à atteindre les conditions optimales. Dans ce cas, l'ajout d'autres systèmes passifs, tels que des isolants, voir même de systèmes actifs (brasseurs d'air, climatisation) est nécessaire.

Cependant, si l'installation photovoltaïque possédait une lame d'air ouverte, ces conditions de confort seraient bien plus faciles à atteindre. Il n'est pas sûr qu'elles soient atteintes localement, mais ce pourrait être un apport non négligeable dans l'optimisation énergétique du bâtiment. Donc, il est essentiel de

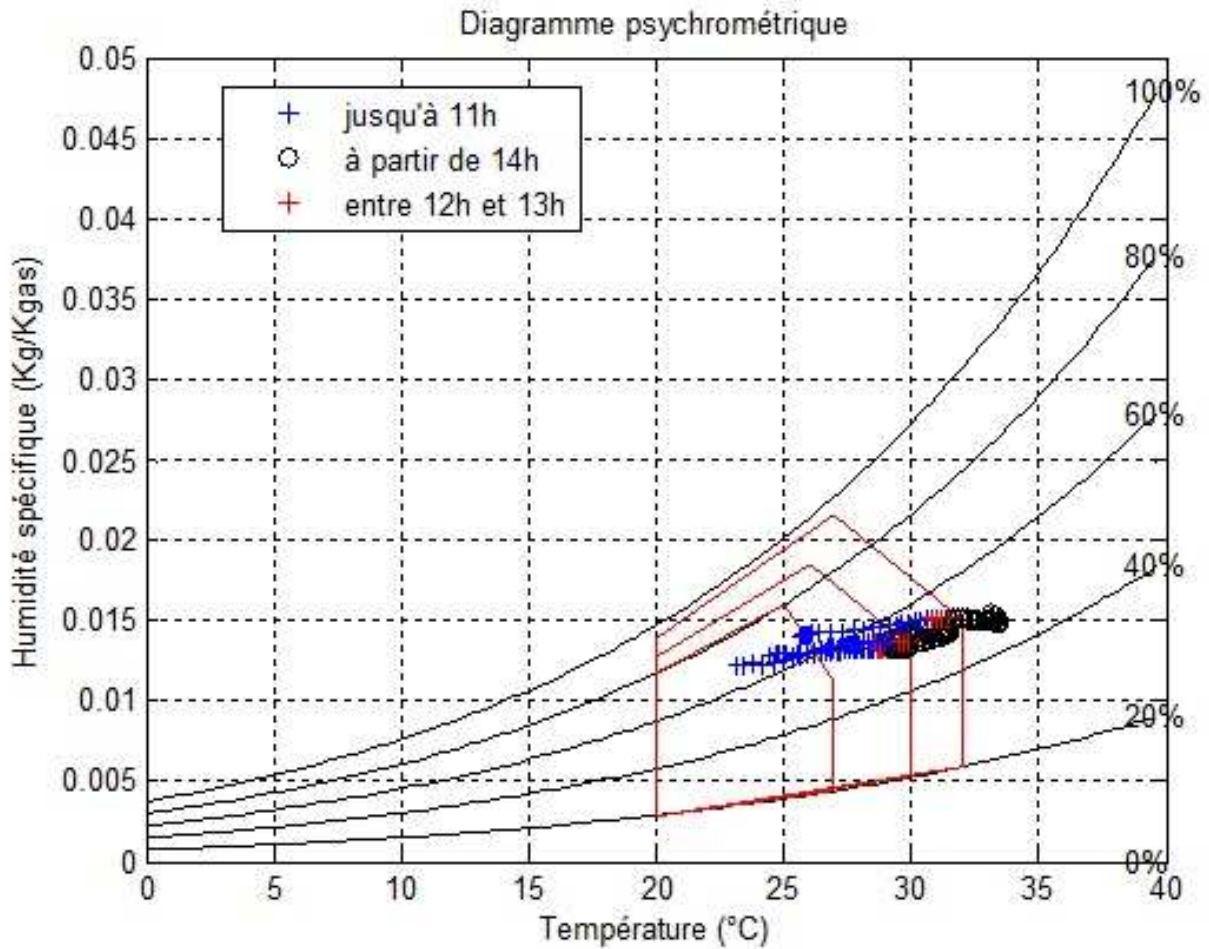


FIGURE IV.48 : Diagramme de confort du bâtiment équipé de panneaux photovoltaïques.

pouvoir mieux modéliser ce type de lames d'air ouvertes, qui par ailleurs se retrouvent souvent dans d'autres parties du bâtiment.

Pour affiner cette étude, nous pouvons étudier l'indice de vote moyen PMV, qui permet d'évaluer le pourcentage de personnes qui se sentiront en confort. La valeur de cet indice fournit également une appréciation de la sensation de confort allant chaud à froid, en passant par cinq autres paliers de confort (tiède, légèrement tiède, neutre, légèrement frais et frais).

En traçant cet indice sur la période étudiée, nous constatons que nous sommes en conditions de confort seulement en fin de nuit (cf Figure IV.49).

La Figure IV.49 montre que l'indice PMV n'est pas respecté, et donc qu'un grand nombre de personnes risquent de se sentir dans une situation d'inconfort. Pour être plus précis, ils auront chaud.

Cependant, cet indice a été calculé grâce à un modèle de lame d'air qui n'est pas encore totalement validé, alors qu'il faudrait qu'il le soit pour s'assurer de la pertinence des résultats. Malgré cela, le modèle peut quand même montrer l'impact que peut avoir un panneau photovoltaïque. Cet impact est positif, même si dans l'étude proposée, nous ne pouvons être assurés de son amplitude.

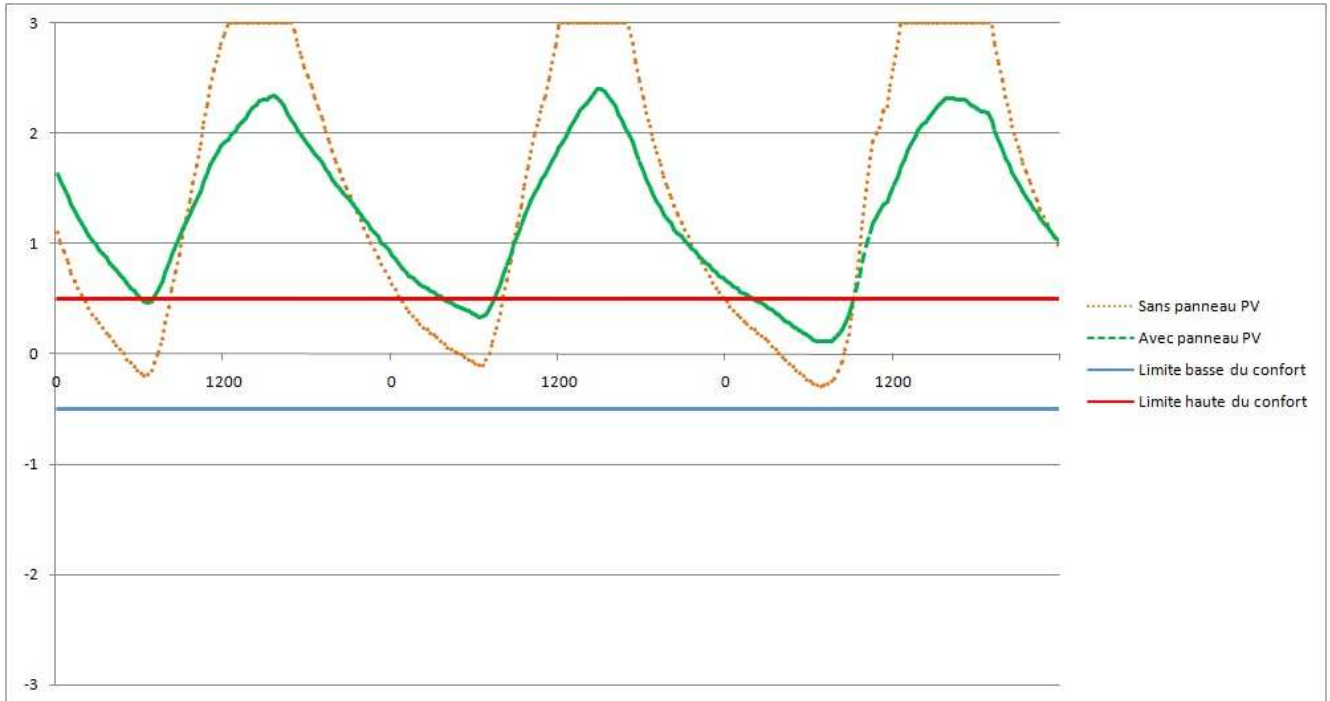


FIGURE IV.49 : Tracé de l'indice PMV pour les bâtiments non équipé et équipé de panneaux photovoltaïques.

Tout l'intérêt de monter de nouvelles expérimentations apparaît alors. En effet, les différentes études expérimentales du projet PVbat vont permettre de tester une grande quantité de lames d'airs différentes, et constater leurs effets sur le confort thermique à l'intérieur du bâtiment. L'installation photovoltaïque sera démontable aisément, et la structure qui la supporte sera modulable (inclinaison et épaisseurs de lame d'air variables). De plus, la lame d'air sera équipée d'une batterie de capteurs, permettant de mesurer ces propriétés (températures, vitesses d'air, etc.). Ces capteurs seront insérés dans la lame d'air sur un support mobile (cf Figure IV.50).

Le projet PVbat permettra donc, dès son financement, de finaliser les études menées au cours de cette thèse, mais aussi de mettre en place un nouvel outil expérimental pour l'analyse des complexes de toitures, qu'ils soient de nature photovoltaïque ou pas.

IV.F CONCLUSION DU CHAPITRE IV

Le modèle thermique de panneau photovoltaïque intégré ou semi-intégré au bâtiment a pu être validé complètement ou en partie dans deux configurations, dont l'une est celle couramment utilisée à l'île de La Réunion. Les deux configurations étaient constituées de panneaux PV posés sur la toiture à l'aide d'une armature créant une lame d'air entre la toiture du bâtiment et le panneau PV. La première des deux configurations, dont le modèle a été complètement validé, avait sa lame d'air confinée, la seconde l'avait ouverte aux deux extrémités dans le sens d'inclinaison de la toiture.

En ce qui concerne le modèle de panneau PV avec lame d'air ouverte sous le panneau, le modèle radiatif a été validé, et pour le cas des cellules ISOTEST le modèle convectif n'a pu être complètement défini.

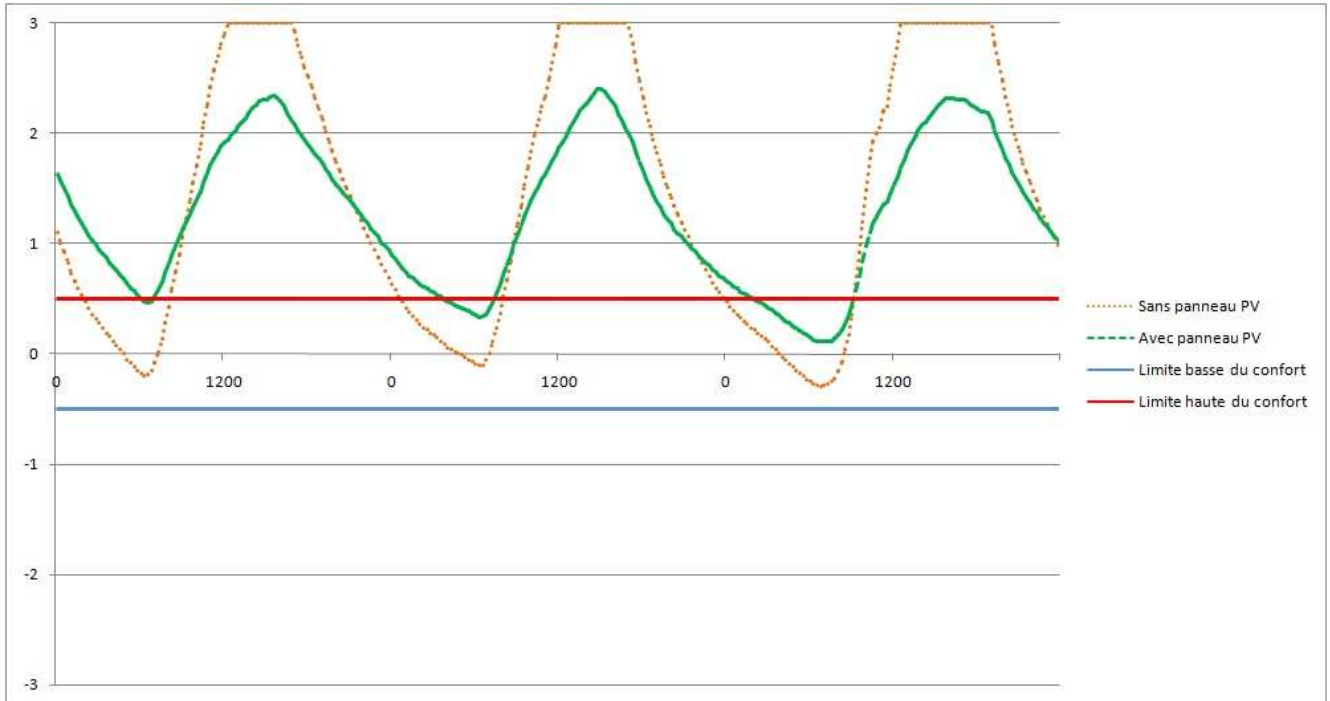


FIGURE IV.50 : Vue de la structure porteuse des appareils de mesures situés dans la lame d'air sous PV.

Un coefficient d'échange convectif a été établi grâce aux séquences d'optimisation, mais il n'est valable que pour la période étudiée, et que pour la configuration de lame d'air présente sur l'ISOTEST. Il semble évident que d'autres expérimentations ou l'utilisation de codes CFD soient les seules solutions pour établir un modèle adéquat. Cependant, l'obtention par optimisation d'un coefficient d'échange convectif représentatif de l'échange thermique laisse à penser qu'une modélisation empirique ou mathématique doit être possible.

Les expérimentations ont montré que la seconde configuration est plus propice à un rafraîchissement de la toiture (cf Figure III.20), qu'à priori, elle doit augmenter le rendement du panneau photovoltaïque en le refroidissant mieux de part l'écoulement naturel d'air dans la lame. Ceci a été identifié dans les résultats présentés. Un autre point important concernant le rendement est qu'il est dépendant de la température du panneau PV, et qu'il va diminuer avec l'augmentation de cette variable. Dans les gammes de température qui ont été étudiées, celle qui est la plus proche de celle du semi conducteur est la température de sous-face PV et elle est correctement prédite dans les deux cas modélisés, ce qui laisse à penser que le productible PV associé est lui aussi correctement prédit.

Des écarts importants apparaissaient lors de la confrontation des modèles aux mesures, mais il a été démontré qu'ils étaient dus aux conditions environnementales de l'expérimentation, essentiellement des effets de masques en début et en fin de journée. Mis à part ces écarts, la validation des modèles a montré une concordance proche de 5%, voir même en dessous, entre le modèle et les mesures associées. De plus, ces remarques sur la prise de mesure des conditions environnementales nous a amené à nous équiper d'une station météorologique portable pour les futures expérimentations en environnement réel, afin de limiter les écarts dus à une prise de mesure trop éloignée du bâtiment étudié.

De plus, le modèle radiatif de matériaux semi-transparent est capable de prédire correctement le productible PV disponible en fonction de la température du panneau ainsi que l'énergie transmise par

le milieu multi-couches semi-transparent. Il prédit les données calculées par le modèle à simple diode à moins de 2% près [Chenni *et al.*, 2007a].

Pour pouvoir valider complètement le modèle de panneau PV, des expérimentations devront être menées à une échelle plus grande. Tout d'abord pour avoir des données de confort exploitables, mais aussi pour pouvoir confronter le modèle à des conditions plus proches de celles des bâtiments à échelle réelle. En effet, le code a été mis en place de manière à prendre en compte des éléments de bâtiments, mais les lames d'air de la cellule ISOTEST sont proches des limites d'utilisation des modèles convectifs présentés.

Un dernier point qu'il est important de préciser est que le modèle est en théorie capable de modéliser tous types de semi-conducteurs, mais aussi tous types de matériau semi-transparentes. Son implémentation générique devrait faciliter son utilisation pour la modélisation de parois complexes multi-couches présentes dans le bâtiment qu'elles soient semi-transparentes et/ou photovoltaïques. Enfin, son développement et son couplage avec d'autres types de modèles devraient aussi être facilités.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

IV.G CONCLUSION

Cette thèse a eu pour but l'étude des panneaux photovoltaïques en tant que parois complexes intégrées au bâtiment. Les objectifs fixés en début de thèse étaient la mise en évidence de l'impact de telles installations sur le confort dans le bâtiment et réciproquement l'impact du bâtiment sur la production photovoltaïque.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a mis en évidence la nécessité de créer un modèle capable de représenter ce type de parois de façon intégrée au bâtiment. En effet des modèles existent, mais le couplage thermique entre le panneau photovoltaïque et le bâtiment n'était pas fait de manière totalement couplée. Un modèle a alors été mis en place afin de modéliser les quatre types d'échanges d'énergies mis en jeu dans le système : conductifs, convectifs, radiatifs et photo-électriques.

Dans un second temps, ce modèle a été implémenté de façon générique pour pouvoir décrire toutes parois photovoltaïques. Il a été intégré au code de calcul *ISOLAB*, afin de faciliter son utilisation et pouvoir le tester sur un code de bâtiment validé.

Troisièmement une série d'expérimentation a été lancée sur les cellules ISOTEST, représentatives de bâtiments à échelles réduites, afin de quantifier dans un premier temps l'impact que pourraient avoir les installations photovoltaïques sur la température de l'enceinte d'un bâtiment, puis dans un second temps récolter des données in situ pour la validation du modèle.

Le processus de validation proposé a consisté, dans un premier temps, à comparer les résultats de simulation aux données expérimentales recueillies. Puis, dans un second temps, à procéder à une analyse de sensibilité des paramètres du modèle afin d'identifier les paramètres les plus influents. Certains de ces paramètres ont fait l'objet d'une séquence d'optimisation sur la base des données expérimentales en vue de valider le modèle.

Pour effectuer les séquences d'optimisation, le logiciel GenOpt a été utilisé. Un couplage a été réalisé avec *ISOLAB*, à travers un processus interfacé permettant d'entrer directement les paramètres de l'optimisation et de lancer la méthode associée.

L'optimisation a permis de valider la partie radiative du modèle qui permet de convertir le rayonnement solaire en électricité et de déterminer le flux transmis par le panneau PV, le modèle convectif de la lame d'air confinée, et a montré que des expérimentations supplémentaires spécifiques à la lame

d'air ouverte devaient être menées dans le but d'établir un nouveau modèle convectif et le valider. Au niveau du bâtiment en lui-même, le champ de température prédit est conforme aux critères de validité, en dessous de 5% pour la plupart des éléments du bâtiment aux erreurs dues à l'environnement de l'expérimentation près.

IV.H PERSPECTIVES

Pour tenter d'améliorer le modèle, des études expérimentales à plus grande échelle sont d'ores et déjà prévues.

Premièrement, une expérimentation à échelle 1 sera menée sur la cellule LGI, un support de la plateforme expérimentale du laboratoire PIMENT situé à l'IUT de Saint-Pierre (La Réunion). La LGI sera équipée en panneaux photovoltaïques sur sa toiture, qui seront installés de manière à pouvoir mesurer les vitesses d'air dans une lame d'air paramétrable. Ceci fournira des données expérimentales plus complètes pour la validation du modèle. Une autre piste pour son amélioration de ce modèle est aussi l'utilisation d'un code CFD. L'objectif serait alors de mettre en place des modèles simplifiés à partir des résultats de simulations numériques.

Cette expérimentation ainsi qu'une étude expérimentale en site réel font l'objet d'un partenariat avec un industriel local, à travers le projet (PVBat) labellisé par le pôle de compétitivité CapEnergie. Ce projet concerne l'expérimentation de différents types de toitures photovoltaïques, ainsi que la mise en place d'un outil d'aide à la décision et à la conception de bâtiment équipés de panneaux PV intégrés ou semi-intégrés pour les maîtres d'œuvres (Bureaux d'études, recherche, etc.).

Au niveau du modèle lui-même, il est prévu de le développer afin d'intégrer tous types de parois en partie ou complètement semi-transparentes rencontrées dans le bâtiment, de l'adapter aux cas des panneaux solaires thermiques et hybrides (PV/T). Il sera aussi intéressant d'étudier les parois complexes photovoltaïques verticales telles que les baies vitrées photovoltaïques ou encore les murs Trombe PV. De plus, comme il a été indiqué au cours de la rédaction de cette thèse, le code de simulation *ISOLAB* est un prototype destiné à la mise en œuvre simplifiée de nouveaux modèles de composants de bâtiment dans le cadre de la recherche. A terme, le modèle de panneau PV créé sera intégré à *CODYRUN*, code de calcul destiné aux professionnels.

D'autres types de parois étudiées actuellement dans le laboratoire, telles que les parois comprenant des matériaux à changements de phases ou des parois végétalisées pourront à terme faire l'objet d'études dans le cadre d'une utilisation combinée de plusieurs types de ces parois.

Une autre perspective intéressante concerne le couplage qui a été mis en place entre le logiciel d'optimisation GenOpt et le code de simulation *ISOLAB*. Ce couplage, qui a été fait de manière complètement générique, va permettre à chaque nouveau modèle qui sera intégré au code de pouvoir être optimisé sans devoir passer obligatoirement par une démarche longue et parfois complexe d'implémentation de méthodes d'optimisation. Lorsqu'un modèle est intégré au code, et que ces paramètres sont disponibles dans le fichier de description du bâtiment, le couplage d'optimisation est effectif. De plus, des séquences d'optimisation pourront être lancées en amont de certaines études afin de pouvoir mieux choisir les meilleures expérimentations ou encore les meilleurs modèles. Ceci permettra très souvent un gain de

Conclusion

temps et sera un atout appréciable dans la démarche de validation, et facilitera les choix d'orientation des études qui seront menées.

Enfin, pour toutes les adaptations spécifiques du modèle, des validations numériques et/ou expérimentales devront être mises en place.

BIBLIOGRAPHIE

A MODÉLISATION THERMIQUE

- [Al-Asmar *et al.*, 1996] AL-ASMAR, H. R., JONES, B. W. et MATTERSON, D. K. (1996). *Experimental Evaluation of Attic Radiant Barriers (RP-577)*, volume 102, pages 297–306. Faxon Finder, ashrae transactions édition.
- [Allard *et al.*, 1986] ALLARD, F., INARD, C. et ROLDAN, A. (1986). Etude comparative de différentes méthodes de modélisation des échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde dans une cellule d'habitation. Rapport technique 442, I.T.B.T.P.
- [Altaç et Kurtul, 2007] ALTAÇ, Z. et KURTUL, Z. (2007). Natural convection in tilted rectangular enclosures with a vertically situated hot plate inside. *Applied Thermal Engineering*, 27(11-12):1832 – 1840.
- [Arnold *et al.*, 1976] ARNOLD, J., CATTON, I. et EDWARDS, D. (1976). Experimental investigation of natural convection in inclined rectangular regions of differing aspect ratios. *Journal of Heat Transfer*, pages 67–71.
- [Awbi et Hatton, 1999] AWBI, H. B. et HATTON, H. (1999). Natural convection from heated room surfaces. *Energy and Buildings*, 30:233–244.
- [Beckman *et al.*, 1994] BECKMAN, W. A., BROMAN, L., FIKSEL, A., KLEIN, S. A., LINDBERG, E., SCHULER, M. et THORNTON, J. (1994). Trnsys the most complete solar energy system modeling and simulation software. *Renewable Energy*, 5(1-4):486 – 488. <ce :title>Climate change Energy and the environment </ce :title>.
- [Bejan, 1984] BEJAN, A. (1984). *Convection Heat Transfer*. John Wiley & Sons, Durham, USA.
- [Boyer, 1993] BOYER, H. (1993). *Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France.
- [Boyer *et al.*, 1996] BOYER, H., CHABRIAT, J. P., GRONDIN-PEREZ, B., TOURRAND, C. et BRAU BRAU, J. (1996). Thermal building simulation and computer generation of nodal models. *Building and Environment*, 31(3):207 – 214.
- [Boyer *et al.*, 1998] BOYER, H., GARDE, F., GATINA, J. C. et BRAU, J. (1998). A multi model approach of thermal building simulation for design and research purposes. *Energy and Buildings*, 28:71–79.
- [Boyer *et al.*, 2006] BOYER, H., GARDE, F., MIRANVILLE, F. et MARA, T. (2006). Interzone short wave radiative couplings through windows and large openings : proposal of a simplified model. Lisboa, Portugal. Healthy Buildings.
- [Chapman, 1974] CHAPMAN, A. J. (1974). *Heat Transfer*. Macmillan Publishing Group, 4e éd. édition.
- [Clarke, 1985] CLARKE, J. (1985). *Energy Simulation in Building Design*. Butterworth-Heinemann, Glasgow, Scotland.
- [Coussirat *et al.*, 2008] COUSSIRAT, M., GUARDO, A., JOU, E., EGUSQUIZA, E., CUERVA, E. et ALAVEDRA, P. (2008). Performance and influence of numerical sub-models on the cfd simulation of free and forced convection in double-glazed ventilated façades. *Energy and Buildings*, 40(10):1781 – 1789.

- [Crawley *et al.*, 2001] CRAWLEY, D. B., LAWRIE, L. K., WINKELMANN, F. C., BUHL, W., HUANG, Y., PEDERSEN, C. O., STRAND, R. K., LIESEN, R. J., FISHER, D. E., WITTE, M. J. et GLAZER, J. (2001). Energyplus : creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4):319 – 331.
- [Daguenet, 1985] DAGUENET, M. (1985). *Les séchoirs solaires : théorie et pratique*. UNESCO, France.
- [Dimoudi *et al.*, 2006] DIMOUDI, A., LYKLOUDIS, S. et ANDROUTSOPOULOS, A. (2006). Thermal performance of an innovative roof component. *Renewable Energy*, 31(14):2257 – 2271.
- [Druet, 2009] DRUET, P.-t. (2009). Existence of weak solutions to the time-dependent mhd equations coupled to the heat equation with nonlocal radiation boundary conditions. *Nonlinear Analysis : Real World Applications*, 10(5):2914 – 2936.
- [Elsherbiny, 1996] ELSHERBINY, S. M. (1996). Free convection in inclined air layers heated from above. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(18):3925 – 3930.
- [Fauconnier et Grelat, 1981] FAUCONNIER, R. et GRELAT, A. (1981). *Thermique de l'habitat : bases de Thermique de l'habitat*. Numéro 395. Annales de l' I.T.B.T.P.
- [Ferziger et Peric, 2002] FERZIGER, J. H. et PERIC, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, 3rd édition.
- [Fomichev *et al.*, 2006] FOMICHEV, A., CURCIJA, C., BALAGURUNATHAN, B. et STOCKI, M. (2006). Investigation of heat transfer effects of sloped and ventilated internal cavities of framing systems. Rapport technique, Center for Energy Efficiency and Renewable Energy, Massachusetts, USA.
- [González *et al.*, 2009] GONZÁLEZ, M., GARCÍA-FERNÁNDEZ, C. et VELARDE, P. (2009). 2d numerical comparison between sn and m1 radiation transport methods. *Annals of Nuclear Energy*, 36(7):886 – 895.
- [Gueymard et duPont, 2009] GUEYMARD, C. A. et DUPONT, W. C. (2009). Spectral effects on the transmittance, solar heat gain, and performance rating of glazing systems. *Solar Energy*, 83(6):940 – 953.
- [Incropera et Dewitt, 1996] INCROPERA, F. P. et DEWITT, D. P. (1996). *Introduction to heat transfer*. Wiley, New-York, 3e éd édition.
- [Judkoff et Neymark, 1995] JUDKOFF, R. et NEYMARK, J. (1995). A procedure for testing the ability of whole building energy simulation programs to thermally model the building fabric. *Journal of Solar Energy Engineering*, 117:7–15.
- [Karlekar et Desmond, 1977] KARLEKAR, B. et DESMOND, R. (1977). *Engineering Heat Transfer*. West Publishing Co, USA.
- [Kim *et al.*, 2008] KIM, K., LEE, E. et SONG, T.-H. (2008). Discrete ordinates interpolation method for radiative heat transfer problems in three-dimensional enclosures filled with non-gray or scattering medium. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 109(15):2579 – 2589.
- [Krauter, 2006] KRAUTER, S. (2006). *Solar Electric Power Generation - Photovoltaic Energy Systems*. Springer, Rio de Janeiro, Brazil.
- [Luo *et al.*, 2008] LUO, J.-F., CHANG, S.-L., YANG, J.-K., SHEN, X. et INOUSSA, G. (2008). Transient coupled heat transfer in a rectangular medium with black surfaces. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 109(15):2603 – 2612.
- [Mara, 2000] MARA, T. (2000). *Contribution à la validation globale d'un logiciel de simulation thermo-aéroulque du bâtiment : proposition de nouveaux outils d'aide à la validation*. Thèse de doctorat, Université de La Réunion, France.
- [Marshall et Dimova-Malinovska, 2001] MARSHALL, J. et DIMOVA-MALINOVSKA, D. (2001). *Photovoltaic and Photoactive Materials - Properties, Technology and Applications*. Kluwer Academic Publishers.
- [Miranville, 2002] MIRANVILLE, F. (2002). *Modélisation, expérimentation et validation expérimentale de complexes de toitures incluant des produits minces réfléchissants en climat tropical*. Thèse de doctorat, Université de La Réunion, France.

- [Miranville *et al.*, 2008] MIRANVILLE, F., BOYER, H., LAURET, P. et LUCAS, F. (2008). A combined approach for determining the thermal performance of radiant barriers under field conditions. *Solar Energy*, 82(5):399 – 410.
- [Miranville *et al.*, 2006] MIRANVILLE, F., BOYER, H., LUCAS, F. et SÉRIACARUPIN, J. (2006). Numerical evaluation of the thermal performances of roof-mounted radiant barriers. Gaborone, Botswana.
- [Miranville *et al.*, 2003] MIRANVILLE, F., BOYER, H., THIERRY, M. et GARDE, F. (2003). On the thermal behaviour of roof-mounted radiant barriers under tropical and humid climatic conditions : modelling and empirical validation. *Energy and Buildings*, 35(10):997 – 1008.
- [Modest, 2003] MODEST, M. (2003). *Radiative Heat Transfer*. Academic Press, USA.
- [MSC, 2008] MSC (2008). *MSC.Patran Thermal User's Guide*. MSC Software.
- [Nebeker et Tong, 1992] NEBEKER, B. M. et TONG, T. W. (1992). Heat transfer in rectangular reflective insulation systems. *Journal of thermal insulation and building envelopes*.
- [Parker, 2005] PARKER, D. (2005). Technical support for development of an attic simulation model for the california energy commission. Rapport technique, Florida Solar Energy Center, Florida, USA.
- [Sacadura, 2000] SACADURA, J. F. (2000). *Initiation aux transferts thermiques*. INSA de Lyon, France, tec & doc édition.
- [Safer, 2006] SAFER, N. (2006). *Modélisation des façades de type double-peau équipées de protections solaires : approches multi-échelles*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France.
- [Siegel, 1992] SIEGEL, R. (1992). *Thermal Radiation Heat Transfer*. Hemisphere, Washington, USA.
- [Siegel, 1996] SIEGEL, R. (1996). Transient heat transfer in a semitransparent radiating layer with boundary convection and surface reflections. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(1):69 – 79.
- [Siegel, 1998] SIEGEL, R. (1998). Transient effects of radiative transfer in semitransparent materials. *International Journal of Engineering Science*, 36(12-14):1701 – 1739.
- [Skoplaski et Palyvos, 2008] SKOPLASKI, E. et PALYVOS, J. A. (2008). Operating temperature of photovoltaic modules : A survey of pertinent correlation. *Renewable Energy*, 35:2681–2687.
- [Tari, 2010] TARI, I. (2010). Natural convection simulations and numerical determination of critical tilt angles for a parallel plate channel. *Energy Conversion and Management*, 51(4):685 – 695.
- [Wang et Hamed, 2006] WANG, H. et HAMED, M. (2006). Flow mode-transition of natural convection in inclined rectangular enclosures subjected to bidirectional temperature gradients. *International Journal of Thermal Sciences*, 45(8):782 – 795.
- [Wetter, 2009] WETTER, M. (2009). A generic optimization program. In R. LAMBERTS, C. O. R. N. et J. HENSEN, e., éditeurs : *Proc. of the 7th IBPSA Conference*, pages 601–608, Rio de Janeiro, Brazil.
- [Wu, 2009] WU, C. (2009). Monte carlo simulation of transient radiative transfer in a medium with a variable refractive index. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(19-20):4151 – 4159.
- [Xamán *et al.*, 2008] XAMÁN, J., ARCE, J., ÁLVAREZ, G. et CHÁVEZ, Y. (2008). Laminar and turbulent natural convection combined with surface thermal radiation in a square cavity with a glass wall. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(12):1630 – 1638.
- [Yi *et al.*, 2009] YI, H.-L., ZHEN, B., TAN, H.-P. et TONG, T. W. (2009). Radiative heat transfer in a participating medium with specular-diffuse surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(19-20):4229 – 4235.
- [Zhang et Tan, 2009] ZHANG, H.-C. et TAN, H.-P. (2009). Evaluation of numerical scattering in finite volume method for solving radiative transfer equation by a central laser incidence model. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110(18):1965 – 1977.

- [Zhang *et al.*, 2009] ZHANG, L., ZHAO, J. et LIU, L. (2009). Finite element method for modeling radiative transfer in semitransparent graded index cylindrical medium. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110(13):1085 – 1096.
- [Zhao *et al.*, 2009] ZHAO, S.-Y., ZHANG, B.-M. et DU, S.-Y. (2009). An inverse analysis to determine conductive and radiative properties of a fibrous medium. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110(13):1111 – 1123.

B MODÉLISATION PV

- [Anderson *et al.*, 2009] ANDERSON, T., DUKE, M., MORRISON, G. et CARSON, J. (2009). Performance of a building integrated photovoltaic/thermal (BIPVt) solar collector. *Solar Energy*, 83(4):445 – 455.
- [Armstrong et Hurley, 2011] ARMSTRONG, S. et HURLEY, W. G. (2011). Response to comments by e. sartori on A thermal model for PV panels under varying atmospheric conditions, by s. armstrong and w.g. hurley, applied thermal engineering 30, 1388-1395 (2010). *Applied Thermal Engineering*, 31(2-3):402 – 402.
- [Badescu, 2002] BADESCU, V. (2002). Model of a space heating system integrating a heat pump, photo-thermal collectors and solar cells. *Renewable Energy*, 27(4):489 – 505.
- [Benatallah *et al.*, 2007] BENATIALLAH, A., MOSTEFAOUI, R., BOUBEKRI, M. et BOUBEKRI, N. (2007). A simulation model for sizing pv installations. *Desalination*, 209(1-3):97 – 101. The Ninth Arab International Conference on Solar Energy (AICSE-9), Kingdom of Bahrain.
- [Chao *et al.*, 2008] CHAO, K.-H., HO, S.-H. et WANG, M.-H. (2008). Modeling and fault diagnosis of a photovoltaic system. *Electric Power Systems Research*, 78(1):97 – 105.
- [Chenni *et al.*, 2007a] CHENNI, R., MAKHLOUF, M., KERBACHE, T. et BOUZID, A. (2007a). A detailed modeling method for photovoltaic cells. *Energy*, 32(9):1724 – 1730.
- [Chenni *et al.*, 2007b] CHENNI, R., MAKHLOUF, M., KERBACHE, T. et BOUZID, A. (2007b). A detailed modeling method for photovoltaic cells. *Energy*.
- [Chow, 2003] CHOW, T. T. (2003). Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, 75(2):143 – 152.
- [Chow *et al.*, 2007] CHOW, T. T., HE, W., JI, J. et CHAN, A. L. S. (2007). Performance evaluation of photovoltaic-thermosyphon system for subtropical climate application. *Solar Energy*, 81(1):123 – 130.
- [Corbin et Zhai, 2010] CORBIN, C. D. et ZHAI, Z. J. (2010). Experimental and numerical investigation on thermal and electrical performance of a building integrated photovoltaic-thermal collector system. *Energy and Buildings*, 42(1):76 – 82. International Conference on Building Energy and Environment (COBEE 2008).
- [Dehra, 2009] DEHRA, H. (2009). A two dimensional thermal network model for a photovoltaic solar wall. *Solar Energy*, 83(11):1933 – 1942.
- [Gupta *et al.*, 2011] GUPTA, A., SAINI, R. et SHARMA, M. (2011). Modelling of hybrid energy system–part i : Problem formulation and model development. *Renewable Energy*, 36(2):459 – 465.
- [Han *et al.*, 2009] HAN, J., LU, L. et YANG, H. (2009). Thermal behavior of a novel type see-through glazing system with integrated pv cells. *Building and Environment*, 44(10):2129 – 2136.
- [Ji *et al.*, 2007] JI, J., LU, J.-P., CHOW, T.-T., HE, W. et PEI, G. (2007). A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. *Applied Energy*, 84(2):222 – 237.

- [Krichen *et al.*, 2009] KRICHEN, M., ZOUARI, A. et BEN ARAB, A. (2009). A simple analytical model of thin films crystalline silicon solar cell with quasi-monocrystalline porous silicon at the backside. *Microelectronics Journal*, 40(1):120 – 125.
- [Lu et Yao, 2007] LU, Z. et YAO, Q. (2007). Energy analysis of silicon solar cell modules based on an optical model for arbitrary layers. *Solar Energy*, 81(5):636 – 647.
- [Mattei *et al.*, 2006] MATTEI, M., NOTTON, G., CRISTOFARI, C., MUSELLI, M. et POGGI, P. (2006). Calculation of the polycrystalline pv module temperature using a simple method of energy balance. *Renewable Energy*, 31(4):553 – 567.
- [Mei *et al.*, 2003] MEI, L., INFELD, D., EICKER, U. et FUX, V. (2003). Thermal modelling of a building with an integrated ventilated pv façade. *Energy and Buildings*, 35(6):605 – 617.
- [Miyazaki *et al.*, 2005] MIYAZAKI, T., AKISAWA, A. et KASHIWAGI, T. (2005). Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows. *Renewable Energy*.
- [Mondol *et al.*, 2005a] MONDOL, J., YOHANIS, Y., SMYTH, M. et NORTON, B. (2005a). Long-term validated simulation of a building integrated photovoltaic system. *Solar Energy*, 78(2):163 – 176. ISES Solar World Congress 2003.
- [Mondol *et al.*, 2005b] MONDOL, J., YOHANIS, Y., SMYTH, M. et NORTON, B. (2005b). Long-term validated simulation of a building integrated photovoltaic system. *Solar Energy*.
- [Muresan, 2005] MURESAN, C. (2005). *Etude des transferts thermiques rayonnement spectral-conduction-convection naturelle dans des systèmes photovoltaïques hybrides en vue de leur intégration au bâtiment*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France.
- [Notton *et al.*, 2005] NOTTON, G., CRISTOFARI, C., MATTEI, M. et POGGI, P. (2005). Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences. *Applied Thermal Engineering*, 25(17-18):2854 – 2877.
- [Othman *et al.*, 2007] OTHMAN, M. Y., YATIM, B., SOPIAN, K. et ABU BAKAR, M. N. (2007). Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector. *Desalination*, 209(1-3):43 – 49. The Ninth Arab International Conference on Solar Energy (AICSE-9), Kingdom of Bahrain.
- [Santbergen *et al.*, 2010] SANTBERGEN, R., GOUD, J., ZEMAN, M., van ROOSMALEN, J. et van ZOLINGEN, R. (2010). The am1.5 absorption factor of thin-film solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(5):715 – 723.
- [Sartori, 2011] SARTORI, E. (2011). Comments on A thermal model for PV panels under varying atmospheric conditions, by s. armstrong and w.g. hurley, applied thermal engineering 30 (2010) 1388-1395. *Applied Thermal Engineering*, 31(2-3):400 – 401.
- [Skoplaki *et al.*, 2008] SKOPLAKI, E., BOUDOUVIS, A. et PALYVOS, J. (2008). A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(11):1393 – 1402.
- [Skoplaki et Palyvos, 2009] SKOPLAKI, E. et PALYVOS, J. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance : A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(5):614 – 624.
- [Tonui et Tripanagnostopoulos, 2007] TONUJ, J. et TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. (2007). Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy*, 81(4):498 – 511.
- [Tonui et Tripanagnostopoulos, 2008] TONUJ, J. et TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. (2008). Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation. *Solar Energy*, 82(1):1 – 12.
- [Trinuruk *et al.*, 2009] TRINURUK, P., SORAPIPATANA, C. et CHENVIDHYA, D. (2009). Estimating operating cell temperature of BIPV modules in thailand. *Renewable Energy*, 34(11):2515 – 2523.
- [Vaillon *et al.*, 2006] VAILLON, R., ROBIN, L., MURESAN, C. et MÉNÉZO, C. (2006). Modeling of coupled spectral radiation, thermal and carrier transport in a silicon photovoltaic cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(23-24):4454 – 4468.

- [Yang *et al.*, 2000] YANG, H., BURNETT, J. et JI, J. (2000). Simple approach to cooling load component calculation through pv walls. *Energy and Buildings*.
- [Yoo et Manz, 2010] YOO, S.-H. et MANZ, H. (2010). Available remodeling simulation for a BIPV as a shading device. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, In Press, Corrected Proof.
- [Yoo et Manz, 2011] YOO, S.-H. et MANZ, H. (2011). Available remodeling simulation for a BIPV as a shading device. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(1):394 – 397. 19th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (PVSEC-19) Jeju, Korea, 9-13 November 2009.
- [Zhu *et al.*, 2002] ZHU, Z., ZHU, X. et SUN, J. (2002). Numerical analysis of heat transfer in a photovoltaic panel, i : Indoor cases. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29(4):497 – 508.
- [Zogou et Stapountzis, 2011] ZOGOÛ, O. et STAPOUNTZIS, H. (2011). Energy analysis of an improved concept of integrated pv panels in an office building in central Greece. *Applied Energy*, 88(3):853 – 866.

C EXPÉRIMENTATION PV

- [Bazilian *et al.*, 2002] BAZILIAN, M. D., KAMALANATHAN, H. et PRASAD, D. K. (2002). Thermographic analysis of a building integrated photovoltaic system. *Renewable Energy*, 26(3):449 – 461.
- [Bloem, 2008] BLOEM, J. J. (2008). Evaluation of a PV-integrated building application in a well-controlled outdoor test environment. *Building and Environment*, 43(2):205 – 216.
- [Bohórquez *et al.*, 2009] BOHÓRQUEZ, M. A. M., GÓMEZ, J. M. E. et MÁRQUEZ, J. M. A. (2009). A new and inexpensive temperature-measuring system : Application to photovoltaic solar facilities. *Solar Energy*, 83(6):883 – 890.
- [Brinkworth *et al.*, 1997] BRINKWORTH, B., CROSS, B., MARSHALL, R. et YANG, H. (1997). Thermal regulation of photovoltaic cladding. *Solar Energy*, 61(3):169 – 178.
- [Chow *et al.*, 2006] CHOW, T., HE, W. et JI, J. (2006). Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application. *Solar Energy*, 80(3):298 – 306.
- [Chow *et al.*, 2007] CHOW, T., HE, W. et JI, J. (2007). An experimental study of façade-integrated photovoltaic/water-heating system. *Applied Thermal Engineering*, 27(1):37 – 45.
- [Chow *et al.*, 2009] CHOW, T., PEI, G., FONG, K., LIN, Z., CHAN, A. L. S. et JI, J. (2009). Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover. *Applied Energy*, 86(3):310 – 316.
- [Clarke *et al.*, 1996] CLARKE, J. A., HAND, J. W., JOHNSTONE, C. M., KELLY, N. et STRACHAN, P. A. (1996). Photovoltaic-integrated building facades. *Renewable Energy*, 8(1-4):475 – 479. Special Issue World Renewable Energy Congress Renewable Energy, Energy Efficiency and the Environment.
- [Dominguez *et al.*, 2011] DOMINGUEZ, A., KLEISSL, J. et LUVALL, J. C. (2011). Effects of solar photovoltaic panels on roof heat transfer. *Solar Energy*, 85(9):2244 – 2255.
- [Gxasheka *et al.*, 2005] GXASHEKA, A., van DYK, E. et MEYER, E. (2005). Evaluation of performance parameters of PV modules deployed outdoors. *Renewable Energy*, 30(4):611 – 620.
- [He *et al.*, 2011] HE, W., ZHANG, Y., SUN, W., HOU, J., JIANG, Q. et JI, J. (2011). Experimental and numerical investigation on the performance of amorphous silicon photovoltaics window in East China. *Building and Environment*, 46(2):363 – 369.
- [Hirata *et al.*, 1998] HIRATA, Y., INASAKA, T. et TANI, T. (1998). Output variation of photovoltaic modules with environmental factors – ii : seasonal variation. *Solar Energy*, 63(3):185 – 189.

- [Hirata et Tani, 1995] HIRATA, Y. et TANI, T. (1995). Output variation of photovoltaic modules with environmental factors—i. the effect of spectral solar radiation on photovoltaic module output. *Solar Energy*, 55(6):463 – 468.
- [Huang et al., 2004] HUANG, M., EAMES, P. et NORTON, B. (2004). Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(12-13):2715 – 2733.
- [Jiang et al., 2008] JIANG, B., JI, J. et YI, H. (2008). The influence of PV coverage ratio on thermal and electrical performance of photovoltaic-trombe wall. *Renewable Energy*, 33(11):2491 – 2498.
- [Joshi et al., 2009] JOSHI, A. S., DINCER, I. et REDDY, B. V. (2009). Thermodynamic assesment of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 83(8):1139 – 1149.
- [Joshi et Tiwari, 2007] JOSHI, A. S. et TIWARI, A. (2007). Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) air collector. *Renewable Energy*, 32(13):2223 – 2241.
- [Kalogirou et Tripanagnostopoulos, 2006] KALOGIROU, S. et TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. (2006). Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy Conversion and Management*, 47(18-19):3368 – 3382.
- [Khedari et al., 2002] KHEDARI, J., YIMSAMERJIT, P. et HIRUNLABH, J. (2002). Experimental investigation of free convection in roof solar collector. *Building and Environment*, 37(5):455 – 459.
- [Krauter et al., 1999] KRAUTER, S., ARAÚJO, R. G., SCHROER, S., HANITSCH, R., SALHI, M. J., TRIEBEL, C. et LEMOINE, R. (1999). Combined photovoltaic and solar thermal systems for facade integration and building insulation. *Solar Energy*, 67(4-6):239 – 248.
- [Lu et Yao, 2007] LU, Z. et YAO, Q. (2007). Energy analysis of silicon solar cell modules based on an optical model for arbitrary layers. *Solar Energy*, 81(5):636 – 647.
- [Makrides et al., 2009] MAKRIDES, G., ZINSSER, B., GEORGHIOU, G. E., SCHUBERT, M. et WERNER, J. H. (2009). Temperature behaviour of different photovoltaic systems installed in Cyprus and Germany. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(6-7):1095 – 1099. 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference.
- [Malik et Salmi, 2003] MALIK, A. Q. et SALMI, J. B. H. D. (2003). Outdoor testing of single crystal silicon solar cells. *Renewable Energy*, 28(9):1433 – 1445.
- [Minemoto et al., 2007] MINEMOTO, T., NAGAE, S. et TAKAKURA, H. (2007). Impact of spectral irradiance distribution and temperature on the outdoor performance of amorphous si photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(10):919 – 923.
- [Miranville, 1999] MIRANVILLE, F. (1999). Mise en place d'une plate-forme expérimentale : Réalisation et instrumentation d'un dispositif de caractérisation d'isolants minces réfléchissants. Mémoire de D.E.A., Université de La Réunion, France.
- [Miranville et al., 2000] MIRANVILLE, F., FOCK, E., GARDE, F. et HERVE, P. (2000). Experimental study of the thermal performances of a composite roof including a reflective insulation material under tropical humid climatic conditions. In SAYIGH, A., éditeur : *World Renewable Energy Congress VI*, pages 586 – 589. Pergamon, Oxford.
- [Nagano et al., 2003] NAGANO, K., MOCHIDA, T., SHIMAKURA, K., MURASHITA, K. et TAKEDA, S. (2003). Development of thermal-photovoltaic hybrid exterior wallboards incorporating PV cells in and their winter performances. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 77(3):265 – 282.
- [Park et al., 2010] PARK, K. E., KANG, H. G., KIM, H. I., YU, G. J. et KIM, J. T. (2010). Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic module. *Energy*, 35:2681–2687.
- [Santbergen et van Zolingen, 2008] SANTBERGEN, R. et van ZOLINGEN, R. (2008). The absorption factor of crystalline silicon PV cells : A numerical and experimental study. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(4):432 – 444.

- [Tiwari et Sodha, 2006] TIWARI, A. et SODHA, M. (2006). Performance evaluation of solar PV/T system : An experimental validation. *Solar Energy*, 80(7):751 – 759.
- [Trinuruk *et al.*, 2007] TRINURUK, P., SORAPIPATANA, C. et CHENVIDHYA, D. (2007). Effects of air gap spacing between a photovoltaic panel and building envelope on electricity generation and heat gains through a building. *Asian Journal of Energy and Environment*, 8(1 and 2):73–95.
- [Ubertini et Desideri, 2003] UBERTINI, S. et DESIDERI, U. (2003). Performance estimation and experimental measurements of a photovoltaic roof. *Renewable Energy*, 28(12):1833 – 1850.
- [Zhai *et al.*, 2005] ZHAI, X., DAI, Y. et WANG, R. (2005). Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors. *Applied Thermal Engineering*, 25(5-6):741 – 757.
- [Zondag, 2005] ZONDAG, A. H. (2005). Flate-plate PV-Thermal collectors and systems : A review. renewable and sustainable energy reviews. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:891–959.
- [Zondag, 2001] ZONDAG, H. A. (2001). Combined PV-air collector as heat pump air preheater. staffelstein. Rapport technique, Netherlands Energy Research Foundation, Netherlands.

D INTÉGRATION PHOTOVOLTAÏQUE AU BÂTIMENT (BIPV)

- [Bazilian, 2002] BAZILIAN, M. D. (2002). Australia's first BIPV-thermal test facility (an acre funded research project). *In PV in Europe*, Italy.
- [Bazilian et Prasad, 2001] BAZILIAN, M. D. et PRASAD, D. (2001). Thermal and electrical performance monitoring of a combined BIPV array and modular heat recovery system. *In ISES Solar World Congress Adelaide*, Australia.
- [Cherruault et Wheldon, 2001] CHERRUAULT, J. et WHELDON, A. (2001). Evaluation of a BIPV roof, designed for expandability and using coloured cells. Rapport technique, DTI Sustainable Energy Programmes, Reading, England.
- [Chow *et al.*, 2008] CHOW, T. T., HE, W., CHAN, A. L. S., FONG, K., LIN, Z. et JI, J. (2008). Computer modeling and experimental validation of a building-integrated photovoltaic and water heating system. *Applied Thermal Engineering*, 28(11-12):1356 – 1364.
- [Friling *et al.*, 2009a] FRILING, N., JIMÉNEZ, M. J., BLOEM, H. et MADSEN, H. (2009a). Modelling the heat dynamics building integrated and ventilated photovoltaic modules. *Energy and Buildings*, pages 1051–1057.
- [Friling *et al.*, 2009b] FRILING, N., JIMÉNEZ, M. J., BLOEM, H. et MADSEN, H. (2009b). Modelling the heat dynamics of building integrated and ventilated photovoltaic modules. *Energy and Buildings*, 41(10): 1051 – 1057.
- [Fung et Yang, 2008] FUNG, T. Y. et YANG, H. (2008). Study on thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings. *Energy and Buildings*, 40(3):341 – 350.
- [Guiavarch et Peuportier, 2006] GUIAVARCH, A. et PEUPORTIER, B. (2006). Photovoltaic collectors efficiency according to their integration in buildings. *Solar Energy*, 80:65–77.
- [Ji *et al.*, 2007] JI, J., YI, H., HE, W., PEI, G., LU, J. et JIANG, B. (2007). Modeling of a novel Trombe wall with pv cells. *Building and Environment*, 42(3):1544 – 1552.
- [Kondratenko, 2003] KONDRATENKO, I. V. (2003). *Urban retrofit building integrated photovoltaics [BIPV] in Schotland, with particular reference to double skin facades*. Thèse de doctorat, , University of Glasgow, Schotland.

- [Kropf, 2003] KROPF, S. (2003). *Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden durch gegenseitige Ergänzung von Simulation und Messung am Beispiel der Hinterlüftung gebäudeintegrierter Photovoltaik*. Thèse de doctorat, ETH Zurich, Suisse.
- [Mei et al., 2009] MEI, L., INFELD, D. G., GOTTSCHALG, R., LOVEDAY, D. L., DAVIES, D. et BERRY, M. (2009). Equilibrium thermal characteristics of building integrated photovoltaic tilted roof. *Solar Energy*, 83:1893–1901.
- [Steven et Benjamin, 2010] STEVEN, V. D. et BENJAMIN, F. (2010). Active thermal insulators : finite elements modelling and parametric study of thermoelectric modules integrated into a double pane glazing system. *Energy and Buildings*, 42:1156–1164.
- [Tian et al., 2006] TIAN, W., WANG WANG, Y., XIE, Y., WU, D., ZHU, L. et REN, J. (2006). Effect of building integrated photovoltaic on microclimate of urban canopy layer. *Building and Environment*, 42:1891–1901.
- [Trinuruk et al., 2009] TRINURUK, P., SORAPIPATANA, C. et CHENVIDHYA, D. (2009). Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand. *Renewable Energy*.
- [Wang et al., 2005] WANG, Y., TIAN, W., REN, J., ZHU, L. et WANG, Q. (2005). Influence of a building's integrated-photovoltaic on heating and cooling loads. *Applied Energy*, pages 989–1003.
- [Xu et Dessel, 2007] XU, X. et DESSEL, V. S. (2007). Evaluation of a prototype active building envelope window-system. *Energy and Buildings*, 40:168–174.

E CONCEPTION PV ET ÉTUDES DE CAS

- [Amer, 2006] AMER, E. H. (2006). Passive options for solar cooling of buildings in arid areas. *Energy*, 31(8-9):1332 – 1344.
- [Bahaj, 2003] BAHAJ, A. S. (2003). Photovoltaic roofing : issues of design and integration into buildings. *Renewable Energy*, 28(14):2195 – 2204.
- [Bakker et al., 2005] BAKKER, M., ZONDAG, H., ELSWIJK, M., STROOTMAN, K. et JONG, M. (2005). Performance and costs of a roof-sized PV/Thermal array combined with a ground coupled heat pump. *Solar Energy*, 78(2):331 – 339. ISES Solar World Congress 2003.
- [Bücher et al., 1998] BÜCHER, K., KLEISS, G. et DÄTZNER, D. (1998). Photovoltaic modules in buildings : Performance and safety. *Renewable Energy*, 15(1-4):545 – 551.
- [Becker, 2008] BECKER, R. (2008). Fundamentals of performance-based building design. *Building Simulation*, 1:356–371. 10.1007/s12273-008-8527-8.
- [Chan et al., 2010] CHAN, H.-Y., RIFFAT, S. B. et ZHU, J. (2010). Review of passive solar heating and cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2):781 – 789.
- [Chandel et Aggarwal, 2008] CHANDEL, S. et AGGARWAL, R. (2008). Performance evaluation of a passive solar building in western himalayas. *Renewable Energy*, 33(10):2166 – 2173.
- [Charalambous et al., 2007] CHARALAMBOUS, P., MAIDMENT, G., KALOGIROU, S. et YIAKOUMETTI, K. (2007). Photovoltaic thermal (PV/T) collectors : A review. *Applied Thermal Engineering*, 27(2-3):275 – 286.
- [Chau et al., 2010] CHAU, J. L. H., CHEN, R.-T., HWANG, G.-L., TSAI, P.-Y. et LIN, C.-C. (2010). Transparent solar cell window module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(3):588 – 591.
- [Chungloo et Limmeechokchai, 2007] CHUNGLOO, S. et LIMMEECHOKCHAI, B. (2007). Application of passive cooling systems in the hot and humid climate : The case study of solar chimney and wetted roof in thailand. *Building and Environment*, 42(9):3341 – 3351.

- [Colaco *et al.*, 2008] COLACO, S., KURIAN, C., GEORGE, V. et COLACO, A. (2008). Prospective techniques of effective daylight harvesting in commercial buildings by employing window glazing, dynamic shading devices and dimming control : a literature review. *Building Simulation*, 1:279–289. 10.1007/s12273-008-8126-8.
- [Connolly *et al.*, 2010] CONNOLLY, D., LUND, H., MATHIESEN, B. et LEAHY, M. (2010). A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, 87(4):1059 – 1082.
- [Daguenet, 1985] DAGUENET, M. (1985). *Les séchoirs solaires : théorie et pratique*. UNESCO.
- [Enrique *et al.*, 2010] ENRIQUE, J., ANDÚJAR, J. et BOHÓRQUEZ, M. (2010). A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications. *Solar Energy*, 84(1):79 – 89.
- [Fakra, 2009] FAKRA, A. H. (2009). *Intégration de modèles d'éclairage à un code de calcul en physique du bâtiment : modélisation, validation et applications*. Thèse de doctorat, Université de La Réunion, France.
- [Granqvist, 2007] GRANQVIST, C. G. (2007). Transparent conductors as solar energy materials : A panoramic review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(17):1529 – 1598.
- [Green, 2003] GREEN, M. A. (2003). Crystalline and thin-film silicon solar cells : state of the art and future potential. *Solar Energy*, 74(3):181 – 192.
- [He *et al.*, 2006] HE, W., CHOW, T.-T., JI, J., LU, J., PEI, G. et CHAN, L.-s. (2006). Hybrid photovoltaic and thermal solar-collector designed for natural circulation of water. *Applied Energy*, 83(3):199 – 210.
- [Huang *et al.*, 2006] HUANG, B. J., SUN, F. et Ho, R. (2006). Near-maximum-power-point-operation (nmppo) design of photovoltaic power generation system. *Solar Energy*, 80(8):1003 – 1020.
- [Infield *et al.*, 2006] INFELD, D., EICKER, U., FUX, V., MEI, L. et SCHUMACHER, J. (2006). A simplified approach to thermal performance calculation for building integrated mechanically ventilated PV facades. *Building and Environment*, 41(7):893 – 901.
- [Infield *et al.*, 2004] INFELD, D., MEI, L. et EICKER, U. (2004). Thermal performance estimation for ventilated PV facades. *Solar Energy*, 76(1-3):93 – 98. Solar World Congress 2001.
- [Kalogirou et Tripanagnostopoulos, 2007] KALOGIROU, S. et TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. (2007). Industrial application of PV/T solar energy systems. *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9):1259 – 1270.
- [Omer *et al.*, 2003] OMER, S. A., WILSON, R. et RIFFAT, S. B. (2003). Monitoring results of two examples of building integrated PV (BIPV) systems in the uk. *Renewable Energy*, 28(9):1387 – 1399.
- [Parida *et al.*, 2011] PARIDA, B., INIYAN, S. et GOIC, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3):1625 – 1636.
- [Robles-Ocampo *et al.*, 2007] ROBLES-OCAMPO, B., RUÍZ-VÁSQUEZ, E., CANSECO-SÁNCHEZ, H., CORNEJO-MEZA, R., TRÁPAGA-MARTÍNEZ, G., GARCÍA-RODRIGUEZ, F., GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, J. et VOROBIEV, Y. (2007). Photovoltaic/thermal solar hybrid system with bifacial PV module and transparent plane collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(20):1966 – 1971.
- [Tonui et Tripanagnostopoulos, 2007] TONUJ, J. et TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. (2007). Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy*, 32(4):623 – 637.
- TURCOTTE, D. et SHERIFF, F. (2003). Design de tests expérimentaux pour l'optimisation de systèmes hybrides. *Hybridinfo*.
- [Vokas *et al.*, 2006] VOKAS, G., CHRISTANDONIS, N. et SKITTIDES, F. (2006). Hybrid photovoltaic-thermal systems for domestic heating and cooling—a theoretical approach. *Solar Energy*, 80(5):607 – 615.
- [Vorobiev *et al.*, 2006] VOROBIEV, Y., GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, J., VOROBIEV, P. et BULAT, L. (2006). Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion. *Solar Energy*, 80(2):170 – 176. Solar Cells and Solar Energy Materials 2004.

- [Yang *et al.*, 2000] YANG, H., BURNETT, J. et JI, J. (2000). Simple approach to cooling load component calculation through PV walls. *Energy and Buildings*, 31(3):285 – 290.
- [Yoo et Lee, 2002] YOO, S.-H. et LEE, E.-T. (2002). Efficiency characteristic of building integrated photovoltaics as a shading device. *Building and Environment*, 37(6):615 – 623.
- [Yoo *et al.*, 1998] YOO, S.-H., LEE, E.-T. et LEE, J.-K. (1998). Building integrated photovoltaics : A Korean case study. *Solar Energy*, 64(4-6):151 – 161.
- [Yun *et al.*, 2007] YUN, G. Y., McEVOY, M. et STEEMERS, K. (2007). Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic façade. *Solar Energy*, 81(3):383 – 394.
- [Zhang et Chau, 2011] ZHANG, X. et CHAU, K. (2011). An automotive thermoelectric-photovoltaic hybrid energy system using maximum power point tracking. *Energy Conversion and Management*, 52(1):641 – 647.
- [Zhao, 2004] ZHAO, J. (2004). Recent advances of high-efficiency single crystalline silicon solar cells in processing technologies and substrate materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 82(1-2):53 – 64. CANCUN 2003.
- [Zhao *et al.*, 2011] ZHAO, X., ZHANG, X., RIFFAT, S. B. et SU, Y. (2011). Theoretical study of the performance of a novel PV/e roof module for heat pump operation. *Energy Conversion and Management*, 52(1):603 – 614.
- [Zondag, 2008] ZONDAG, H. (2008). Flat-plate PV-Thermal collectors and systems : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4):891 – 959.
- [Zondag *et al.*, 2002] ZONDAG, H. A., de VRIES, D. W., van HELDEN, W. G. J., van ZOLINGEN, R. J. C. et van STEENHOVEN, A. A. (2002). The thermal and electrical yield of a PV-Thermal collector. *Solar Energy*, 72(2):113 – 128.
- [Zondag *et al.*, 2003] ZONDAG, H. A., de VRIES, D. W., van HELDEN, W. G. J., van ZOLINGEN, R. J. C. et van STEENHOVEN, A. A. (2003). The yield of different combined PV-Thermal collector designs. *Solar Energy*, 74(3):253 – 269.

F ARTICLES PUBLIÉS DURANT LA THÈSE

- [Bigot *et al.*, 2008] BIGOT, D., MIRANVILLE, F. et BOYER, H. (2008). Comfort study of a building with photovoltaic panels for the solar protection. In *IASTED Modelling and Simulation*, Gaborone, Botswana.
- [Bigot *et al.*, 2010a] BIGOT, D., MIRANVILLE, F., BOYER, H. et FAKRA, A. (2010a). A sensitivity analysis of a thermal model of photovoltaic panel. In *IASTED Power and Energy Systems*, pages 211–217, Gaborone, Botswana. Acta Press.
- [Bigot *et al.*, 2009] BIGOT, D., MIRANVILLE, F., FAKRA, A. et BOYER, H. (2009). A nodal thermal model for photovoltaic systems : Impact on building temperature fields and elements of validation for tropical and humid climatic conditions. *Energy and Buildings*, 41(11):1117 – 1126.
- [Bigot *et al.*, 2010b] BIGOT, D., MIRANVILLE, F., FAKRA, A. H., INGAR, I., GUICHARD, S. et BOYER, H. (2010b). *Solar Collectors and Panels, Theory and Applications*, chapitre Thermal performance of photovoltaic systems integrated in buildings. SCIYO.
- [Fakra *et al.*, 2011] FAKRA, A., BOYER, H., MIRANVILLE, F. et BIGOT, D. (2011). A simple evaluation of global and diffuse luminous efficacy for all sky conditions in tropical and humid climate. *Renewable Energy*, 36(1):298 – 306.
- [Fakra *et al.*, 2010] FAKRA, A. H., MIRANVILLE, F., BIGOT, D. et BOYER, H. (2010). Elements of validation of artificial lighting through the software codyrun : application to a test case of the international commission on illumination (cie). In *IASTED Power and Energy Systems*, Gaborone, Botswana.
- [Miranville *et al.*, 2008] MIRANVILLE, F., BIGOT, D. et BOYER, H. (2008). Integrated thermal modelling of photovoltaic panels for the solar protection of buildings in tropical and humid conditions. In *COBEE*, Dalian, Chine.
- [Miranville *et al.*, 2011] MIRANVILLE, F., LAURET, P., MEDINA, M. et BIGOT, D. (2011). A simplified model for radiative transfer in building enclosures with low emissivity walls : Development and application to radiant barrier insulation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 133(2):021009.

LISTE DES FIGURES

I.1	Exemples de types de technologie photovoltaïque	19
I.2	Exemples d'installations photovoltaïques	20
I.3	Composition type d'un panneau photovoltaïque, vue en coupe. <i>Source</i> : <i>www.memoireonline.com</i>	20
I.4	Exemple de discrétisation d'un mur bi-couche avec quatre et trois nœuds de discrétisation pour chacune des deux couches.	27
I.5	Coupes transversales de différentes technologies de panneaux photovoltaïques. <i>Source</i> : <i>ADEME</i>	40
I.6	Répartition de la consommation d'énergie en France par secteurs. <i>Source</i> : <i>ADEME</i>	45
I.7	Exemple de diagramme de confort.	47
II.1	Fenêtre de description d'un bâtiment dans <i>ISOLAB</i>	54
II.2	Fenêtre de simulation d'un bâtiment dans <i>ISOLAB</i>	55
II.3	Synoptique de la méthode combinée modélisation / expérimentation / validation (« MEV »).	60
II.4	Schémas en coupe des deux types de lame d'air.	62
II.5	Géométrie type du problème de convection d'une lame d'air confinée inclinée.	65
II.6	Schéma représentant les phénomènes de réflexion dans un milieu multi-couche semi-transparent [Siegel, 1992].	67
II.7	Exemple de discrétisation d'un mur bi-couche.	70
II.8	Bilan des flux « entrants » dans un nœud de type interface.	73

II.9	Bilan des flux « entrants » dans les nœuds de type interface en contact avec une lame d'air.	74
II.10	Circuit équivalent du modèle à quatre paramètres, aussi appelé "single-diode model" [Chenni <i>et al.</i> , 2007a].	75
II.11	Synoptique du calcul de la résistance de série R_s [Chenni <i>et al.</i> , 2007a].	77
II.12	Fenêtre de description des panneaux PV implémentée dans <i>ISOLAB</i> .	81
II.13	Synoptique de l'intégration du modèle de panneau photovoltaïque dans <i>ISOLAB</i> .	82
III.1	Vue d'ensemble de la plateforme expérimentale de l'IUT de Saint-Pierre (La Réunion).	86
III.2	Synoptique des chaînes d'acquisition associées aux cellules expérimentales ISOTEST et LGI.	87
III.3	Station météorologique.	88
III.4	Données météorologiques du 8 et du 9 Janvier 2009.	89
III.5	Prise de vue des quatre bâtiments à échelle réduite (ISOTEST).	90
III.6	Détails de l'instrumentation des cellules ISOTEST et de leur assemblage.	91
III.7	Synoptique de la chaîne d'acquisition de mesures des cellules ISOTEST.	92
III.8	Capteur de température de surface de paroi.	92
III.9	Capteur de température d'air.	93
III.10	Etalonnage de quatre nouveaux capteurs.	95
III.11	Schéma d'installation des capteurs de paroi, de température d'air et des capteurs étalons.	96
III.12	Comparaison des différentes températures de la cellule 4 avec les capteurs étalons.	97
III.13	Campagne de calibration, étude de la température de surface intérieure de paroi nord (Ten).	98
III.14	Campagne de calibration, étude de la température d'air de l'enceinte (Tea).	99
III.15	Campagne de calibration, étude de la température de surface intérieure de la tôle (Tct).	100
III.16	Schéma de l'installation électrique.	101
III.17	Impact d'une installation photovoltaïque sur la température d'air à l'intérieur du bâtiment.	103
III.18	Les quatre cellules ISOTEST équipées pour l'étude comparative.	104

III.19	Résultats de l'étude comparative (mesures prises les 8 et 9 Janvier 2009).	105
III.20	Comparaison de l'influence des deux types de toiture PV sur les températures du panneau et de la lame d'air sous panneau.	106
IV.1	Principe de la méthode d'analyse de sensibilité.	111
IV.2	Exemple de spectre de Fourier obtenu après une analyse de sensibilité.	112
IV.3	Exemple des effets principaux et secondaires obtenus après analyse du spectre de Fourier.	113
IV.4	Fenêtre d'ISOLAB gérant les séquences d'optimisation.	114
IV.5	Vue d'une séquence d'optimisation achevée sous l'environnement GenOpt.	116
IV.6	Vitesse du vent et rayonnement solaire diffus sur la période du 27 Janvier au 2 Février 2009.	119
IV.7	Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour les températures de surface intérieure des parois verticales de l'ISOTEST 1 avant optimisation.	121
IV.8	Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour la température d'air de l'enceinte de l'ISOTEST 1 avant optimisation.	122
IV.9	Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour les températures des éléments de la toiture de l'ISOTEST 1 avant optimisation.	123
IV.10	Écarts modèle/mesure pour les différents éléments de l'ISOTEST 1 avant optimisation.	124
IV.11	Spectre de Fourier obtenu par rapport à la température de lame d'air sous tôle de l'ISOTEST 1.	125
IV.12	Effets des paramètres sur la température de la lame d'air de l'ISOTEST 1.	126
IV.13	Écarts modèle/mesure pour les parois de l'ISOTEST 1 après optimisation.	127
IV.14	Écarts modèle/mesure pour l'air de l'enceinte de l'ISOTEST 1 après optimisation.	128
IV.15	Écarts modèle/mesure pour les éléments de la toiture de l'ISOTEST 1 après optimisation.	129
IV.16	Écarts modèle/mesure pour les différents éléments de l'ISOTEST 1 après optimisation.	129
IV.17	Écarts modèle/mesure pour les parois de l'ISOTEST 1 lors de la phase de corroboration.	130
IV.18	Écarts modèle/mesure pour l'air de l'enceinte de l'ISOTEST 1 lors de la phase de corroboration.	131

IV.19 Écart modèle/mesure pour les éléments de la toiture de l'ISOTEST 1 lors de la phase de corroboration.	132
IV.20 Écart modèle/mesure pour les différents éléments de l'ISOTEST 1 lors de la phase de corroboration.	132
IV.21 Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour une partie des éléments de la toiture PV de l'ISOTEST 2.	134
IV.22 Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour l'air de l'enceinte de l'ISOTEST 2.	135
IV.23 Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour le productible photovoltaïque de l'ISOTEST 2.	136
IV.24 Écart modèle/mesure pour les températures des différents éléments de l'ISOTEST 2. . . .	136
IV.25 Spectre de Fourier obtenu par rapport à la température de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 2.	137
IV.26 Effets des paramètres sur la température de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 2. . .	137
IV.27 Spectre de Fourier obtenu par rapport au productible PV de la cellule ISOTEST 2.	138
IV.28 Effets des paramètres sur le productible PV de la cellule ISOTEST 2.	138
IV.29 Comparaisons des résultats obtenus sur le productible PV de l'ISOTEST 2 avant et après optimisation.	141
IV.30 Comparaisons des résultats obtenus sur les écarts des températures des éléments de la cellule ISOTEST 2 après optimisation.	141
IV.31 Tracé de l'erreur sur la température de face inférieure PV de l'ISOTEST 2 après optimisation.	142
IV.32 Comparaison modèle/mesures pour l'air de l'enceinte de la cellule ISOTEST 2 lors de la phase de corroboration.	144
IV.33 Comparaison modèle/mesures pour la température de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 2 lors de la phase de corroboration.	145
IV.34 Écart modèle/mesures pour l'ensemble des éléments de la cellule ISOTEST 2 lors de la phase de corroboration.	145
IV.35 Erreurs modèle/mesures pour les températures d'air d'enceinte et de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 2 lors de la phase de corroboration.	146
IV.36 Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour les éléments de la toiture PV de la cellule ISOTEST 3.	147

IV.37	Confrontation des résultats du modèle aux mesures pour le productible photovoltaïque de la cellule ISOTEST 3.	148
IV.38	Écarts modèle/mesure pour les températures des différents éléments de la cellule ISOTEST 3.	148
IV.39	Spectre de Fourier obtenu par rapport à la température de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 3.	149
IV.40	Effets des paramètres sur la température de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 3. . .	149
IV.41	Comparaisons des résultats obtenus sur le productible PV de l'ISOTEST 3 avant et après optimisation.	150
IV.42	Écarts modèle/mesures obtenus sur les températures d'air sous PV et de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 3 avant et après optimisation.	151
IV.43	Écarts modèle/mesures obtenus sur les températures d'air sous PV et de face inférieure PV de la cellule ISOTEST 3 avant et après optimisation.	152
IV.44	Vue de la plateforme expérimentale.	153
IV.45	Vue d'édifice de la LGI sans panneau PV.	154
IV.46	Vue de la LGI équipée de panneaux PV.	155
IV.47	Diagramme de confort du bâtiment non équipé de panneaux photovoltaïques.	156
IV.48	Diagramme de confort du bâtiment équipé de panneaux photovoltaïques.	157
IV.49	Tracé de l'indice PMV pour les bâtiments non équipé et équipé de panneaux photovoltaïques.	158
IV.50	Vue de la structure porteuse des appareils de mesures situés dans la lame d'air sous PV. .	159
A - 51	Exemples de spectres solaires reçus par la Terre	184
A - 52	Conversion photovoltaïque au sein d'un semi conducteur	185
A - 53	Lettre d'attestation de labellisation décernée par Capenergies	191
A - 54	Vue de dessus du capteur et du vent	192
A - 55	Fiche technique du panneau PV utilisé pour l'expérimentation	193
A - 56	Fiche technique du panneau PV utilisé pour l'expérimentation	194

LISTE DES TABLEAUX

I.1	Comparaison non exhaustive de plusieurs modèles de panneau photovoltaïque.	31
I.2	Inventaire de différents modèles convectifs associés aux modèles de panneau photovoltaïque du Tableau I.1.	32
I.3	Propriétés optiques des couches constituant un panneau photovoltaïque en silicium polycristallin (valeurs communément admises à incidence normale).	41
I.4	Rendement, avantages et inconvénients des différents types de cellules photovoltaïques [Muresan, 2005].	42
I.5	Coefficients de rendements en fonction de la température [Mattei <i>et al.</i> , 2006].	42
II.1	Angle d'inclinaison θ^* du minimum local du nombre de Nusselt de référence en fonction du rapport de longueur de la cavité.	65
II.2	Paramètres utilisés pour la modélisation électrique	77
III.1	Extrait d'un fichier de données météorologiques de l'année 2009.	88
III.2	Constitution des cellules ISOTEST.	90
IV.1	Écarts-types et écarts maximum de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 1	121
IV.2	Erreurs issues de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 1	123
IV.3	Paramètres les plus influents sur la température de tôle de l'ISOTEST 1 et identifiés comme « optimisables ».	126
IV.4	Paramètres les plus influents sur la température de la lame d'air de l'ISOTEST 1 et identifiés comme « optimisables ».	126

IV.5	Écart-types et écarts maximum de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISO-TEST 1.	127
IV.6	Écart-types et écarts maximum de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISO-TEST 1 lors de la phase de corroboration.	130
IV.7	Écart-types, écarts maximum et erreurs de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 2.	134
IV.8	Paramètres les plus influents sur la température de face inférieure PV de l'ISOTEST 2. . .	139
IV.9	Paramètres les plus influents sur le productible PV de l'ISOTEST 2.	139
IV.10	Paramètres identifiés comme « optimisables » pour les températures des éléments de la toiture et le productible PV pour la cellule ISOTEST 2.	140
IV.11	Écart-types, écarts maximum et erreurs après validation du modèle pour la cellule ISO-TEST 2.	142
IV.12	Paramètres et leurs valeurs avant et après optimisation pour la cellule ISOTEST 2	143
IV.13	Écart-types et écarts maximum de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISO-TEST 2 lors de la phase de corroboration.	144
IV.14	Écart-types, écarts maximum et erreurs après validation du modèle pour la cellule ISO-TEST 3.	151
A - 15	Tarifs d'achat de l'électricité photovoltaïque au 1 ^{er} Juillet 2011.	184
A - 16	Rendement, avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques	185

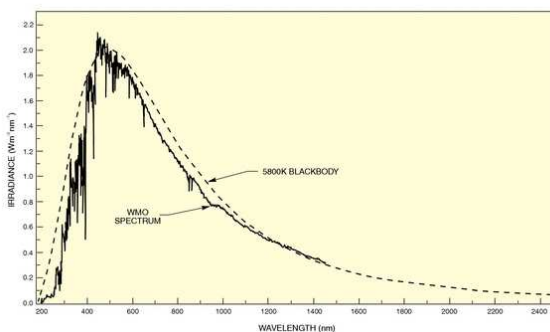
ANNEXES

Type d'installation	Plage de puissance	Tarifs d'achat
Bâtiment résidentiel		
Intégration au bâti	0-9 kWc	0,4255 .Wh ⁻¹
	9-36 kWc	0,3723 .Wh ⁻¹
Intégration simplifiée au bâti	0-36 kWc	0,2746 .Wh ⁻¹
	36-100 kWc	0,2609 .Wh ⁻¹
Enseignement ou santé		
Intégration au bâti	0-36 kWc	0,3674 .Wh ⁻¹
	0-36 kWc	0,2746 .Wh ⁻¹
Intégration simplifiée au bâti	36-100 kWc	0,2609 .Wh ⁻¹
	36-100 kWc	0,2609 .Wh ⁻¹
Autres bâtiments		
Intégration au bâti	0-9 kWc	0,3185 .Wh ⁻¹
	0-36 kWc	0,2746 .Wh ⁻¹
Intégration simplifiée au bâti	36-100 kWc	0,2609 .Wh ⁻¹
	36-100 kWc	0,2609 .Wh ⁻¹
Tout autre type d'installation jusqu'à 12MW		
-	-	0,1169 .Wh ⁻¹

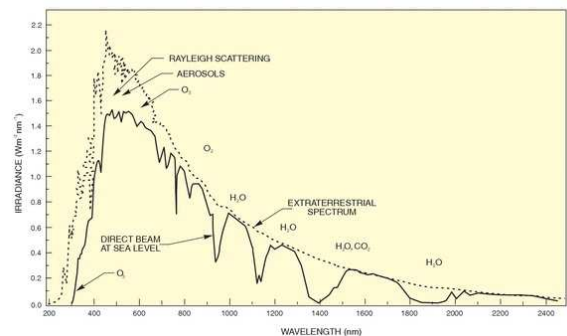
Tableau A - 15 : Tarifs d'achat de l'électricité photovoltaïque au 1^{er} Juillet 2011. Source : <http://www.activolt.fr>

A TARIFS D'ACHAT DE L'ÉLECTRICITÉ PHOTOVOLTAÏQUE AU 1^{er} JUILLET 2011.

B EXEMPLES DE SPECTRE SOLAIRE



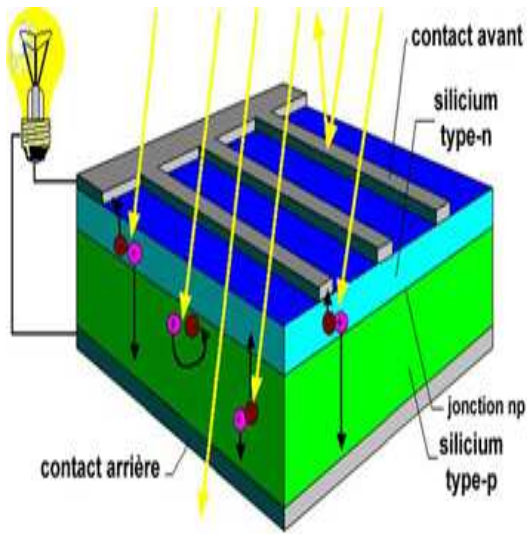
(a) Spectre du rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère terrestre comparé au spectre d'un corps noir à 5800 K.



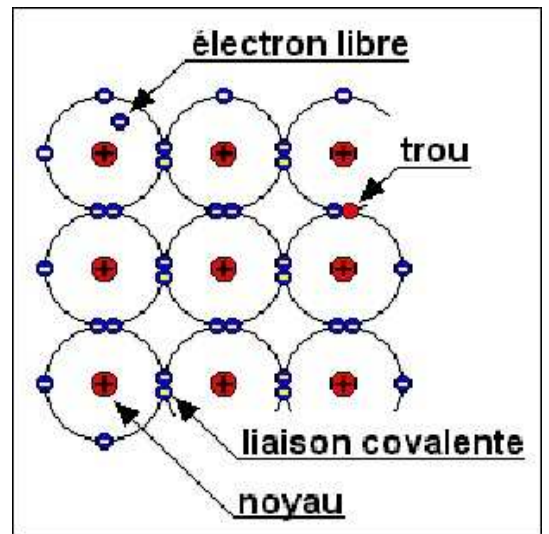
(b) Spectre solaire normalement incident au niveau de la mer par une journée claire. La courbe en pointillés montre le spectre extraterrestre.

FIGURE A - 51 : Spectres solaires reçus par la Terre en dehors de l'atmosphère et au niveau de la mer. Source : <http://www.newport.com>

C CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE AU SEIN D'UN SEMI CONDUCTEUR



(a) Coupe d'une cellule photovoltaïque. Source : CNRS.



(b) Les deux types de dopage d'un cristal de silicium

FIGURE A - 52 : Conversion photovoltaïque au sein d'un semi conducteur

D RENDEMENT, AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Type de cellule		Rendement des panneaux du commerce (en %)	Rendement maximum atteint en laboratoire (en %)	Avantages	Inconvénients
Silicium cristallin	Monocristallin (sc-Si)	16 à 18	24	Fiable et performant Grande ressemblance avec les modèles théoriques	Coût et énergie de fabrication élevés Temps d'amortissement sur l'investissement élevé
	Polycristallin (mc-Si)	13 à 15	18	Fiable et performant Coût en énergie et de fabrication moindre que le silicium monocristallin Recyclage des déchets de l'industrie électronique	Coût de fabrication élevé
Couches minces	Silicium amorphe (a-Si)	6 à 9	11	Faible coût de fabrication Possibilité fabriquer des cellules semi transparentes	Rendement moins important que les cellules à silicium cristallin
	Cadmium telluride (CdTe)	6 à 8,5	16	Faible coût de fabrication	Rendement moins important que les cellules à silicium cristallin
	Diséléniure de cuivre et d'indium (CuInSe ₂)	10,2	17,7	Faible coût de fabrication	Rendement moins important que les cellules à silicium cristallin
	Gallium arsénide (GaAs)	25 à 28	>30	Rendement très important	

Tableau A - 16 : Rendement, avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques

Ces rendements ont été calculés dans les conditions standards : à température constante (25°C) et pour une vitesse de vent de 1m.s⁻¹.

E LETTRE D'ATTESTATION DE LABELLISATION DU PROJET PVBAT

F PRISE EN COMPTE DE L'EFFET DU VENT POUR LA CONVECTION FORCÉE DANS LES LAMES D'AIR OUVERTES

Sur la Figure A - 54, S_1 correspond à la section de la lame d'air, et S_2 correspond à la section de débit équivalent au débit passant par S_1 .

Pour modéliser l'influence du vent sur l'écoulement dans la lame d'air, il a été fait l'approximation suivante : les débits volumiques d'air entrants en S_1 et S_2 sont égaux (Ann. - F.IV.5). Connaissant θ , l'angle entre la direction du vent et la direction du capteur, on peut trouver la vitesse d'écoulement dans la lame d'air :

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 \quad (\text{IV.5})$$

D'où :

$$V_{\text{lame d'air}} = V_1 = \left(\frac{S_2}{S_1}\right) \cdot V_2 \quad (\text{IV.6})$$

$$\text{Avec } \frac{S_2}{S_1} = \cos \theta.$$

En revanche, il ne faut pas oublier que cette méthode est approximative et qu'elle ne prend pas en compte les effets de bord ou de forme de l'installation sur l'écoulement. Pour pouvoir prendre en compte ces effets, il faudrait utiliser un code de simulation de mécanique des fluides permettant de modéliser précisément l'écoulement du vent autour et à travers le panneau photovoltaïque.

G PRISE EN COMPTE DES PERTES DE CHARGE DANS LA LAME D'AIR

Les pertes de charge dans les lames d'air ouvertes des parois PV sont des pertes de charge régulières le long de la lame d'air, et des pertes de charges singulières aux extrémités de la conduite. Dans une conduite, la perte de charge sera fonction de la vitesse d'écoulement du fluide et du diamètre hydraulique D_h de la canalisation. Pour une conduite cylindrique, D_h est le diamètre intérieur de la conduite. Pour une conduite rectangulaire, comme celles rencontrées dans les parois PV, le diamètre hydraulique est :

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{P} \quad (\text{IV.7})$$

Où S est la section de la conduite, et P son périmètre mouillé.

La perte de charge régulière peut être déterminée comme suit :

$$\Delta P = \lambda_{\Delta P} \cdot \frac{\rho \cdot U^2 \cdot L}{2 \cdot D_h} \quad (\text{IV.8})$$

La perte de charge singulière est quand à elle défini par :

$$\Delta P = \lambda_{\Delta P} \cdot \frac{\rho \cdot U^2 \cdot L}{2 \cdot D_h} \quad (\text{IV.9})$$

Cette perte de charge peut ensuite être prise en compte afin de recalculer la vitesse d'air moyenne dans la lame d'air. Ceci peut être fait en utilisant le théorème de Bernoulli généralisé, appliqué aux points d'entrée du fluide 1 et de sortie du fluide 2 :

$$\frac{U_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} = \frac{U_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad (\text{IV.10})$$

On considèrera alors les pressions P_1 et P_2 égales à la pression atmosphérique, et les z_1 et z_2 les altitudes des extrémités de la conduite (respectivement les niveaux bas et haut de la conduite). Les vitesses de fluide U_1 et U_2 en entrée et en sortie de conduite ne sont alors fonction que du dénivelé de la lame de fluide et de la perte de charge. En considérant une vitesse d'air en entrée connue (issue de la prise en compte de l'effet du vent Annexes - Partie F), l'équation (Ann. - G.IV.10) permet de déterminer la vitesse d'air en sortie de lame d'air, et donc la vitesse moyenne du fluide utilisée pour l'évaluation des coefficients d'échanges convectifs :

$$U_2 = \left[\left(\frac{U_1^2}{2 \cdot g} + z_1 - z_2 - \Delta P_r - \Delta P_s \right) \cdot 2 \cdot g \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{IV.11})$$

Avec le dénivelé :

$$\Delta z = z_1 - z_2 = -\sin(\text{inclinaison de la conduite}) \cdot \text{longueur de la conduite} \quad (\text{IV.12})$$

L'équation (IV.11) devient alors :

$$U_2 = \left[\left(\frac{U_1^2}{2 \cdot g} + \Delta z - \Delta P \right) \cdot 2 \cdot g \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{IV.13})$$

Cette équation sera utilisée pour recalculer la vitesse de circulation du fluide dans la conduite en fonction des pertes de charge singulières et régulières de la conduite.

Pour déterminer la perte de charge permettant d'obtenir la vitesse d'air en sortie, il faut déterminer le coefficient de perte de charge $\lambda_{\Delta P}$:

Si $Re < 2300$:

$$\lambda_{\Delta P} = \frac{64}{Re} \quad (\text{IV.14})$$

Si $Re \geq 2300$:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{\Delta P}}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda_{\Delta P}}} + \frac{\epsilon_{\Delta P}}{3,71 \cdot D_h} \right) \quad (IV.15)$$

Avec $\epsilon_{\Delta P}$ la rugosité de la conduite ; pour une conduite lisse comme dans le cas des lames d'air étudiées dans cette thèse, cette rugosité est nulle.

H FICHE TECHNIQUE DU PANNEAU PV INSTALLÉS SUR LES ISOTEST LORS DES SÉ- QUENCES EXPÉRIMENTALES



Le 16 Mai 2011

ATTESTATION DE LABELLISATION

Je soussigné, Monsieur Serge DURAND, Président du Pôle de compétitivité Capenergies, atteste que le projet suivant a été labellisé par le Conseil d'Administration de Capenergies :

Titre : Performances Energétiques de Parois Complexes Actives intégrant des Systèmes Photovoltaïques en Climat Tropical Humide

Acronyme : PVBAT

Partenaires du projet :

- DIJOUX
- Université de la Réunion

P.O Bernard BESNAUOU
Serge DURAND
Président

CAPENERGIES
Château de Cadarache
Bât 906 – La Bergerie
13108 Saint Paul Lez Durance
Tel : 04 42 25 64 25
Fax : 04 42 25 61 70
Contact : contact@capenergies.fr

Association loi 1901
SIRET 488 702 218 00014
APE 913^F
N° TVA intra communautaire FR 69 488 702 218

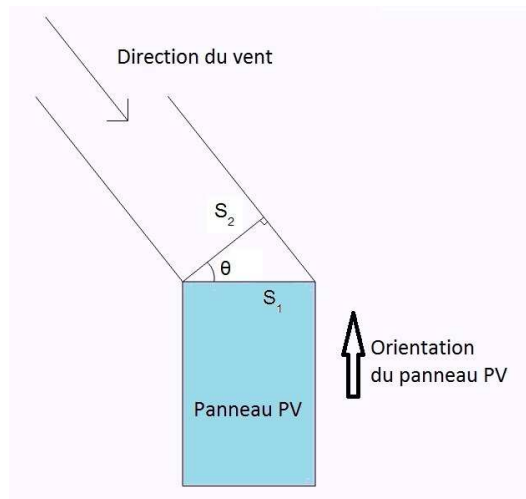


FIGURE A - 54 : Vue de dessus du capteur et du vent

THE NEW VALUE FRONTIER



KC65GX-2P



Module photovoltaïque polycristallin haute puissance



TECHNOLOGIE DE POINTE

Grâce à un travail de recherche intensif, au perfectionnement permanent des procédés de production et à une fabrication hautement automatisée, les modules solaires polycristallins atteignent un standard exceptionnel de qualité et un rendement remarquablement élevé. Les cellules solaires haute puissance Kyocera intégrées de 15 cm x 15,5 cm de dimensions de base atteignent un rendement de 16 % et garantissent un rendement d'énergie annuel extrêmement élevé de l'installation photovoltaïque.

Pour les protéger contre des conditions climatiques très rudes, les cellules sont insérées entre une couverture en verre trempé (résistance à la grêle conforme à IEC 61215 ed. 2, testée par le TÜV) et une feuille d'acétate de vinyle et scellées sur l'envers avec une feuille PET. Le laminé est enchâssé dans un cadre en aluminium solide facile à monter.

La boîte de connexion à l'arrière est équipée de diodes de dérivation qui empêchent la surchauffe des différentes cellules solaires (effet hotspot). Les modules photovoltaïques peuvent être facilement câblés grâce aux câbles solaires et aux prises multicontact prémontées.

Kyocera fabrique toutes les composantes dans ses propres ateliers de production – sans acheter des produits intermédiaires – pour assurer un niveau de qualité toujours aussi élevé des produits.

EXEMPLES D'APPLICATION

- Solutions en îlots (électrification de maisons isolées, de résidences de vacances et de jardins etc.)
- Approvisionnement en courant de villages isolés et d'établissements médicaux dans des régions rurales et des territoires en voie de développement
- Courant de secours, prévention anti-catastrophes
- Systèmes de pompage (alimentation en eau potable et drainage)
- Télécommunication (réseaux radiotéléphonie, stations amplificateurs etc.)
- Huile & Gaz (protection anticorrosion, commande surveillance etc.)



TUVdotCOM Service : plate-forme Internet pour une qualité et une sécurité testées

TUVdotCOM-ID : 0000022553
IEC 61215 ed. 2, IEC 61730 et Protection II

Kyocera est une entreprise enregistrée et certifiée selon ISO 9001 et ISO 14001.



**KYOCERA
SOLAR**

We care!

THE NEW VALUE FRONTIER



KC65GX-2P



Module photovoltaïque polycristallin haute puissance



TECHNOLOGIE DE POINTE

Grâce à un travail de recherche intensif, au perfectionnement permanent des procédés de production et à une fabrication hautement automatisée, les modules solaires polycristallins atteignent un standard exceptionnel de qualité et un rendement remarquablement élevé. Les cellules solaires haute puissance Kyocera intégrées de 15 cm x 15,5 cm de dimensions de base atteignent un rendement de 16 % et garantissent un rendement d'énergie annuel extrêmement élevé de l'installation photovoltaïque.

Pour les protéger contre des conditions climatiques très rudes, les cellules sont insérées entre une couverture en verre trempé (résistance à la grêle conforme à IEC 61215 ed. 2, testée par le TÜV) et une feuille d'acétate de vinyle et scellées sur l'envers avec une feuille PET. Le laminé est enchâssé dans un cadre en aluminium solide facile à monter.

La boîte de connexion à l'arrière est équipée de diodes de dérivation qui empêchent la surchauffe des différentes cellules solaires (effet hotspot). Les modules photovoltaïques peuvent être facilement câblés grâce aux câbles solaires et aux prises multicontact prémontées.

Kyocera fabrique toutes les composantes dans ses propres ateliers de production – sans acheter des produits intermédiaires – pour assurer un niveau de qualité toujours aussi élevé des produits.

EXEMPLES D'APPLICATION

- Solutions en îlots (électrification de maisons isolées, de résidences de vacances et de jardins etc.)
- Approvisionnement en courant de villages isolés et d'établissements médicaux dans des régions rurales et des territoires en voie de développement
- Courant de secours, prévention anti-catastrophes
- Systèmes de pompage (alimentation en eau potable et drainage)
- Télécommunication (réseaux radiotéléphonie, stations amplificateurs etc.)
- Huile & Gaz (protection anticorrosion, commande surveillance etc.)



TUVdotCOM Service : plate-forme Internet pour une qualité et une sécurité testées

TUVdotCOM-ID : 0000022553
IEC 61215 ed. 2, IEC 61730 et Protection II

Kyocera est une entreprise enregistrée et certifiée selon ISO 9001 et ISO 14001.



**KYOCERA
SOLAR**

We care!