



Contribution à l'étude des parois complexes végétalisées : évaluation de la performance énergétique globale en climat tropical humide

Aurélien Jean

► To cite this version:

Aurélien Jean. Contribution à l'étude des parois complexes végétalisées : évaluation de la performance énergétique globale en climat tropical humide. Architecture, aménagement de l'espace. Université de la Réunion, 2015. Français. NNT : 2015LARE0028 . tel-02470090v2

HAL Id: tel-02470090

<https://theses.hal.science/tel-02470090v2>

Submitted on 7 Feb 2020

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.

Contribution à l'Étude des Parois Complexes Végétalisées (PCV) Évaluation de la Performance Énergétique Globale en Climat Tropical Humide

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 8 décembre 2015

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de La Réunion

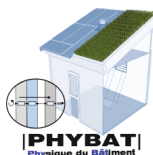
Spécialité: Physique du Bâtiment, Énergie et Environnement

par

Aurélien P. JEAN

devant la commission d'examen composée de

Frédéric MIRANVILLE	Directeur de thèse	<i>Professeur Université de La Réunion, France</i>
Teddy LIBELLE	Co-encadrant	<i>Docteur Université de La Réunion, France</i>
Belkacem ZEGHMATI	Rapporteur externe	<i>Professeur Université de Perpignan, France</i>
Georges ZISSIS	Rapporteur externe	<i>Professeur Université de Toulouse, France</i>
Alain BASTIDE	Examineur	<i>Professeur Université de La Réunion, France</i>
Stéphane GUICHARD	Examineur	<i>Docteur Laboratoire IRISE/CESI-CRITT/CCIR</i>



Contribution à l'Étude des Parois Complexes Végétalisées (PCV)

Évaluation de la Performance Énergétique Globale en Climat Tropical Humide

Manuscrit établi par

AURÉLIEN P. JEAN, groupe thématique PhyBât, Laboratoire PIMENT
Université de La Réunion, FRANCE

Sous la direction de

PR. FRÉDÉRIC MIRANVILLE, groupe thématique PhyBât, Laboratoire PIMENT
Université de La Réunion, FRANCE

Date de Création:	4 novembre 2015
Catégorie:	2 (confidentiel avant et après soutenance)
Édition:	Première (Version β :1)
Commentaires:	Cette thèse de doctorat à reçu le soutien financier de la Région Réunion et de l'Union Européenne (Fond Social Européen)
Droits:	©AURÉLIEN P. JEAN, 2015

Université de La Réunion

Laboratoire PIMENT, Pôle PhyBât
117 rue du général Ailleret
Bâtiment L
97430 Le Tampon
FRANCE

Tel: (+262) (0)262 579 245
Fax: (+262) (0)262 579 540

Courriel: aurelien.jean@univ-reunion.fr
<http://personnel.univ-reunion.fr/ajeau>



À ma famille nucléaire...

« *Omne ignotum pro magnifico* »
TACITE (Agricola, XXX, 4)

Prolégomènes

Remerciements

LES travaux de thèse rapportés dans ce manuscrit ont été réalisés à l'Université de La Réunion, au sein du laboratoire PIMENT (EA 4518). Ils ont fait l'objet d'une allocation régionale de formation doctorale financée conjointement par la Région Réunion et l'Union Européenne (Fond Social Européen).

Je remercie vivement mon directeur de thèse, le Pr Frédéric MIRANVILLE, pour m'avoir proposé un sujet aussi passionnant, mais également pour son soutien, sa confiance, ses précieux conseils et tout le savoir qu'il m'a transmis.

Je remercie chaleureusement Teddy LIBELLE pour son suivi, sa très forte implication et son expertise tout au long de ces travaux.

Je remercie aussi Harry BOYER pour ses articles inattendus, sa confiance et son soutien.

Plus généralement, je remercie vivement le groupe thématique physique du bâtiment (PHYBÂT) pour sa motivation, sa cohésion et son ambiance de travail inégalable. Sans oublier tous ces petits échanges, ces aides mutuelles qui font la différence au quotidien. Comme le cite régulièrement un ami, « *seul on va vite, mais en groupe on va loin !* », cette différence s'est récemment exprimée lors de la fastidieuse relecture de ce document, merci à tous. . .

Mes remerciements s'adressent aussi au laboratoire PIMENT pour son accueil et pour les conditions de travail prodiguées. Mes pensées vont particulièrement aux directeurs successifs les Pr Philippe LAURET et Pr Alain BASTIDE, mais également aux chercheurs et techniciens, répartis sur les différents sites, qui ont de près ou de loin participé à ces recherches.

Je remercie également les professeurs Belkacem ZEGHMATI et Georges ZISSIS pour avoir accepté de rapporter ce manuscrit. Je remercie par ailleurs les autres membres du jury pour avoir accepté d'y participer. Un remerciement particulier est adressé au Pr Alain BASTIDE, directeur du laboratoire PIMENT, pour l'acuité de ses précieux conseils, permettant de prendre du recul sur le sujet.

Un remerciement tout particulier à mes collègues du quotidien, Damien FAKRA, Dimitri BIGOT, Stéphane GUICHARD et bien entendu Bruno MALET-DAMOUR, mais également Placide JAOHINDY, Christelle HATIK, Fiona BENARD, Boris BRANGEON et Volana ASTERIE pour la bonne humeur communicative, leurs aides et conseils, ainsi que leurs présences dans les moments d'euphorie laborieuse ou de douleur. Ne changez rien. Enfin, un remerciement spécial à Lise SAVIDAN pour nos discussions et aventures ineffables. J'ai par ailleurs une pensée pour l'ensemble des doctorants (courage, « *ti hach i coupe gros bois !* »).

J'aimerais également remercier mes collègues du PROFIL pour leur accueil chaleureux et leur bonne humeur, très appréciée au cours de ces deux années. Ce fut une expérience très enrichissante.

J'adresse également des remerciements sincères à l'équipe du service technique du campus du Tampon, dirigée par David LANGLADE, sans qui la mise en œuvre de la première phase de l'expérimentation n'aurait pas pu voir le jour ; mais aussi Éric DELCHER de Stratagem 974 pour ses conseils en métrologie et l'ESIROI-CODE, spécifiquement Steven MENARD pour son aide technique et Mathieu DAVID pour le prêt de matériel. Sans oublier Hubert MARIE, responsable du service technique de l'IUT de Saint-Pierre, pour m'avoir facilité l'accès aux sites et plateformes expérimentales en toutes circonstances.

Enfin, j'aimerais remercier le CIRAD de Saint-Pierre de La Réunion, particulièrement Emmanuel TILLARD et Mathieu LÉCHAUDÉL pour leurs conseils, ainsi que le prêt de matériels indispensables à l'étude des propriétés botaniques des PCV ; mais aussi Serge NABENEZA pour son expertise sur la spectrométrie IR.

Pour finir « *last but not least!* », je tiens à remercier *très* chaleureusement ma famille « nucléaire » à qui est dédié ce manuscrit. Pour l'environnement affectif et intellectuel exceptionnel prodigué, pour son soutien sans faille de tous les instants, pour avoir toujours cru en moi dans toutes mes batailles, MERCI.

Prolégomènes

Philosophie du Manuscrit

La philosophie du manuscrit

Dans le but de véhiculer et transmettre au mieux l'information qu'il contient, il est nécessaire qu'un manuscrit soit structuré, concis et précis. Par ailleurs, il est également important que l'esthétique de l'objet créé induise un plaisir de lecture. Considérant ceci, la philosophie développée est basée sur deux points essentiels : *la clarté du document* et *le plaisir de lecture*.

Par conséquent, le présent manuscrit est le fruit de réflexions ayant pour objectif de maximiser ces deux points essentiels. En effet, en plus du fond, une attention particulière a été apportée à la mise en page générale. Le document est écrit et mis en forme afin d'obtenir la meilleure qualité de lecture possible. En ce sens, la taille de police, sa couleur, la largeur et densité des paragraphes, mais aussi la continuité logique des sections présentées ont été étudiées en vue de faciliter la compréhension et le plaisir de lecture. Ainsi bien que le document soit volumineux, le texte proposé est digeste, aéré et référencé ¹.

Mise en page

— Le texte —

La mise en page a été définie afin d'apporter confort de lecture et esthétique. En effet, les lignes courtes (longueur totale et largeur du texte) permettent une meilleure compréhension. Ceci, car rythmant la lecture, permettant de faire des « micropauses » à l'instar de la ponctuation (virgules et points notamment). Afin de palier à la réduction de la largeur du texte (de manière à avoir autant d'information par page), la police a été diminuée à 10pt. Par ailleurs, la police choisie (LMRoman), ainsi que sa couleur et la largeur marge de tranche (dans laquelle se situe l'onglet), sont adaptées à des caractères de faible dimension permettant une lecture aisée et plus fluide. À noter que cette approche est largement inspirée de la mise en page des excellents et célèbres ouvrages « *Lectures on physics* » de R. FEYNMAN [FEYNMAN et al., 1963]. Enfin, une attention particulière a été apportée à l'aération du texte, celui-ci contribuant grandement à l'esthétique, à la compréhension et donc au plaisir de lecture.

— Le découpage —

Dans le but de transmettre le plus fidèlement possible les idées et méthodes traitées, le document est organisé, hiérarchisé et structuré en fonction des thèmes abordés et de l'importance des arguments présentés.

1. Les liens des références internes au document ne sont visibles que dans la version numérique.

Afin de permettre une synthèse rapide de la logique des chapitres, chacun d’entre eux possède un sommaire succinct particulier, suivi par une page contenant des encadrés indiquant le résumé et si besoin l’approche associée aux recherches traitées. De plus, dans le but de d’améliorer la compréhension, les pages de section le nécessitant possèdent également un entrefilet précisant son objet et l’approche utilisée.

Ces encadrés et entrefilets sont complémentaires et offrent une vision globale du sujet traité. Ils laissent ainsi le choix au lecteur d’approfondir le sujet, donc de lire le chapitre, si celui-ci le souhaite.

Édition

— Volume du document —

L’optimisation de la mise en forme se traduit dans le cas présent par une augmentation du nombre de pages. Ceci étant dû à l’introduction des pages vierges, des sommaires succincts, mais aussi des encadrés d’approches et de résumés, *etc.* Par conséquent, le volume du présent manuscrit ne peut donc pas être directement comparé à celui d’un rapport classique.

Une approximation du nombre « réel » de page est permis par la méthode suivante : soustraire au nombre de page total² quatre pages par partie. Soit un total de 228 pages « réelles³ » pour le présent rapport.

— LaTeX —

La présente philosophie a pu être appliquée grâce à un logiciel d’édition particulier permettant d’atteindre qualitativement les besoins énoncés précédemment. Il s’agit de l’excellent logiciel L^AT_EX, distribué gratuitement sous licence LPPL. Basé sur T_EX⁴, L^AT_EX⁵ est un langage de programmation permettant de créer (entre autres) des documents sous forme PDF de haute qualité⁶.

La qualité graphique inhérente à un document produit par L^AT_EX est principalement due aux fontes propres à T_EX, à l’approche vectorielle ainsi qu’au calcul de la position exacte de chacun des caractères lors de la compilation. À noter que ce positionnement précis permet le strict respect des règles typologiques et typographiques françaises.

Enfin, de nombreux développements ont été effectués afin d’obtenir la mise en page du présent manuscrit. Ceux-ci ont permis la création de codes spécifiques, également nommés « packages », et d’une « classe » de document qui seront à terme diffusés.

2. Défini par les pages ayant une numérotation arabe.

3. Grâce à L^AT_EX ce calcul est aisément implémenté et automatiquement actualisé.

4. T_EX est un langage de programmation compilé dédié à l’édition. Il a été inventé par D. KNUTH.

5. L^AT_EX a été inventé par L. LAMPORT.

6. Infiniment modulaire, les capacités de mise en forme de L^AT_EX sont immenses, le présent rapport en est un bref aperçu.

Prolégomènes

Introduction générale

Dans le contexte environnemental actuel (changement climatique d'origine anthropique), la maîtrise de l'énergie est primordiale. Le secteur du bâtiment étant le poste le plus énergivore en France (47%), l'un des axes majeurs consiste à intégrer la conception bioclimatique des enveloppes aux habitudes constructives. Cette approche permet de limiter le recours à des dispositifs actifs (climatisation ou chauffage) pour atteindre le confort thermique, au profit de dispositifs passifs (dont le principe d'action utilise les moyens naturels). À noter que la conception bioclimatique nécessite une connaissance fine des propriétés thermophysiques des matériaux utilisés, ainsi que des phénomènes de transferts associés ; ceux-ci étant par ailleurs évolutifs, car fonction des conditions météorologiques.

La conception bioclimatique permet dès lors de déterminer des solutions techniques simples et efficaces ; dont beaucoup sont inspirées des pratiques ancestrales et adaptées aux contraintes actuelles. C'est en outre le cas des toitures végétalisées et plus généralement des parois complexes végétalisées (nommées PCV). Présentes depuis plusieurs millénaires dans la zone paléarctique, ce type de paroi a été adapté aux besoins inhérents aux modifications urbaines depuis la révolution industrielle. Étudiées depuis les années 1970, puis commercialisées, divers types de PCV existent sur le marché, mais aucune norme n'existe en France (seul le DTU 43.1 existe, mais il ne s'applique qu'aux toitures végétalisées intensives).

Or, aux vues des multiples avantages offerts par les PCV, leur développement tend à s'accroître à un rythme soutenu. En conséquence, leur usage s'effectue dans un cadre légal non précisé et sans certification des performances thermiques, paramètre clef des normes RT2012 et RTAA-DOM.

Par ailleurs, afin d'être utilisées par les architectes et autres bureaux d'études, il est important que la modélisation de telles parois puisse être intégrée dans des outils de simulation accessible aux acteurs sociaux-économiques. Ces outils permettent ainsi la prédiction du comportement énergétique des PCV, donc leur impact sur le comportement thermique des bâtiments, mais aussi leur adéquation avec les normes en vigueur. Or, aux vues du nombre et de la complexité des phénomènes présents, très peu de code de simulation offrent la possibilité de considérer une PCV. Et pour ces mêmes raisons, les codes existants offrent par conséquent des libertés de conception assez restreintes. Il semble alors important d'initier une démarche de modélisation le permettant.

Ainsi, compte tenu des aspects liés à la performance et à la modélisation des PCV, ces travaux de thèse sont exposés en quatre parties :

Le premier chapitre présente dans un premier temps le contexte de l'étude actuelle, puis synthétise les études portant sur les PCV, dissociant les recherches expérimentales et numériques. Enfin, au regard des éléments présentés, la problématique est formulée.

Le second chapitre est dédié au paradigme dans lequel s'effectue les recherches, *i.e.* à la définition du concept de parois complexe végétalisée (PCV), ainsi qu'aux stratégies et méthodes utilisées.

Le troisième chapitre regroupe l'aspect expérimental de l'étude, permettant de répondre aux questions inhérentes à la pertinence et l'adéquation des PCV sur le territoire Réunionnais. Il comprend de plus la description des scénarii expérimentaux, ainsi que les aspects métrologiques, dont les différents développements nécessaires afin d'accéder aux mesurandes souhaités. Le choix des séquences utilisées, les résultats, ainsi que leurs analyses sont également présentées afin d'apporter une réponse explicite à la problématique.

Enfin, le quatrième chapitre présente les développements numériques spécifiques qui ont été réalisés afin de modéliser et simuler le comportement thermo-hydro-hygrique d'une PCV. À cette fin, le système d'étude est décrit physiquement, puis conceptualisé, afin de permettre la modélisation. Ensuite, l'implémentation au sein d'un code de calcul dédié est abordée (PCVBÂT), décrivant le couplage inter-logiciel (PCVBÂT/ISOLAB) et la résolution couplée des champs observés. Pour finir, des éléments de validation sont proposés.

Prolégomènes

Sommaire général

Remerciements	c
Philosophie du Manuscrit	e
Introduction générale	g
Sommaire général	i
I Contexte et état de l'art	1
1 Introduction	5
2 Étude bibliographique	13
3 Problématique	47
4 Synthèse	51
II Concept de parois complexes végétalisées et méthodologie	53
1 Analyse et définitions syntaxiques	57
2 Stratégie générale	71
3 Méthode et outils	75
4 Synthèse	79
III Expérimentation	81
1 Infrastructures	85
2 Démarche Expérimentale	91
3 Capteurs et chaîne d'acquisition	101
4 Développements spécifiques	117
5 Analyse des séquences Expérimentales	131
6 Exploitation des résultats	145
7 Synthèse	155

IV	Modélisation et Simulation	159
1	Introduction	163
2	Le système d'étude	167
3	Position du problème et formalisme	173
4	Modèles physiques	197
5	Résolution et couplage	211
6	Le code PcvBat	219
7	Simulations	221
8	Synthèse	249
V	Synthèse Générale	251
	Conclusion Générale	253
	Perspectives	255
VI	Bibliographie et Tables	i
	Bibliographie	v
	Table des matières générale	xvii
	Nomenclature	xxvii
	Liste des Tableaux	xxxiii
	Liste des Figures	xxxvii
VII	Annexes	
A	Contexte historique, politique et environnemental	A - 1
B	Précipitation et Rayonnement à l'île de La Réunion	B - 1
C	Les PCV classiques et ligneuses	C - 1
D	Acquisition spécifique des paramètres physiques	D - 1
E	Méthode d'homogénéisation	E - 1
F	Modèles physiques	F - 1
G	Création de PcvBÂT	G - 1
H	Apports à ISOLAB	H - 1
I	Communication sur les toitures végétalisées à La Réunion	I - 1
J	Regard croisé sur les PCV _{ce} à La Réunion et à Hong-Kong	J - 1

Chapitre I

Contexte et état de l'art

*« Il convient de préparer d'abord
le cerveau de l'homme avant que
d'y rien imprimer. Il faut
premièrement apprendre à douter
avant d'apprendre à croire tout. »*

LUDVIG HOLBERG
(PENSÉES MORALES)

Sommaire du chapitre I

1	Introduction	5
1.1	Défis énergétiques et réchauffement global	5
1.2	Les parois végétalisées	8
2	Étude bibliographique	13
2.1	Approche expérimentale	13
2.2	Approche théorique	30
3	Problématique	47
3.1	Le sujet	47
3.2	Objectifs des recherches	48
3.3	Environnement de recherche	48
3.4	Définition de la problématique	50
4	Synthèse	51

Approche

LE présent chapitre introductif a pour fonction de définir succinctement le contexte dans lequel s'inscrivent les travaux de thèse. D'un point de vue macroscopique, le contexte est défini par des problématiques énergétiques et environnementales dans lesquelles s'inscrit le projet. D'un point de vue mésoscopique, le contexte est défini par la synthèse des travaux internationaux.

Ces deux approches constituent une vue d'ensemble. Elles introduisent le contexte nécessaire à la définition de la problématique.

Résumé

LES défis énergétiques et écologiques actuels poussent une partie non négligeable de la classe politique internationale à agir. Par le biais du droit et des incitations financières, cette prise de conscience se répercute au niveau individuel, entre autres, par une nécessité de diminuer la consommation énergétique.

Parmi les solutions possibles se trouve un concept, une méthode apportant partiellement une réponse à toutes les problématiques soulevées ; elles existent pourtant depuis des millénaires, mais il reste beaucoup à apprendre des parois végétalisées. En ce sens, depuis les années 1970 diverses études ont caractérisé leurs impacts thermiques (principalement tempérés, méditerranéen ou continental, mais rarement en climat tropical), établissant des modèles afin de prédire ces derniers (les plus performants sont de types semi-détaillés).

Afin de pouvoir traiter le sujet, et considérant la littérature, notre problématique est composée des trois interrogations suivantes :

1. *Les parois végétalisées sont-elles adaptées au climat réunionnais (tropical humide) ?*
2. *Quelle solution technique mettre en œuvre afin d'adapter les parois végétalisées au mode constructif réunionnais ?*
3. *Comment prévoir de façon fiable et reproductible le comportement et la performance énergétique des parois végétalisées ?*

Dans le but de répondre à ces questions et afin de permettre d'élaborer la définition d'un modèle optimal adapté au contexte climatique de l'île de la Réunion, une étude théorique et expérimentale a été menée. Le chapitre II « Concept de parois complexes végétalisées et méthodologie » en définit le cadre.

Contexte et état de l'art

Section 1

Introduction

1.1 Défis énergétiques et réchauffement global

1.1.1 Les enjeux de la maîtrise de l'énergie

Durant le siècle dernier, la population mondiale a été multipliée par 6 [LIÉBARD et HERBE, 2005]. Couplée aux migrations urbaines, cette augmentation a engendré des problèmes d'occupation des sols (logement), de santé, de confort et surtout d'accès à l'énergie. Or, en parallèle, le développement technologique a induit une évolution des modes de vie provoquant un besoin individuel en énergie toujours croissant. La combinaison de ces deux phénomènes sociétaux conduit à une croissance toujours plus élevée des besoins quotidiens en énergie. C'est dans ce contexte que les chocs pétroliers de 1973 puis de 1979 ont permis une prise de conscience quant à la dépendance énergétique des nations. En conséquence, divers programmes et stratégies furent élaborés, selon les pays, afin de limiter cette dépendance (développement de l'énergie nucléaire civile, de l'énergie photovoltaïque, *etc.*) ou de s'assurer l'accès aux ressources (stratégies géopolitiques). Chacune d'entre elles ayant un impact fort sur l'économie du pays (évolution de la balance commerciale du pays, augmentation du prix de l'énergie, *etc.*). Au début du 21^{ème} siècle, la très grande majorité des pays a adopté (en partie) la stratégie de l'efficacité énergétique et de la réduction des besoins en consommations d'énergie. Celle-ci permet de répondre à la problématique énoncée, mais également à celle de l'environnement, de plus en plus prégnante.

En effet, parallèlement à la crise énergétique, la fin du 20^{ème} siècle et le début du 21^{ème} siècle furent marqués par une prise de conscience : les activités humaines transforment l'environnement de manière notable¹ et irrémédiable. Au-delà de ce constat, l'origine de l'intérêt international pour cette problématique provient d'une crainte fondée : celle d'un impact environnemental néfaste et planétaire. Pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, l'impact anthropique sur la nature pourrait influencer négativement sur ses *habitus*² à l'échelle mondiale, diminuant notamment sa qualité de vie. Ceci principalement à travers l'augmentation³ des problématiques sanitaires, mais aussi *via* la limitation de l'accès aux ressources et autres denrées, ou l'inondation des deltas, provoquant des flux migratoires massifs.

En ce sens, considérant les impacts, la plus grande menace est l'accélération de la cinétique

1. Les prédictions du GIEC estiment en moyenne (selon les scénarii) entre 1,15°C et 5,65°C l'augmentation de la température en surface du globe terrestre en 2100 par rapport à la période préindustrielle. Évolutions qui conduisent globalement à une montée des eaux marines de l'ordre du mètre et localement à une intensification des évolutions des températures (chutes et hausses) ainsi que des phénomènes climatiques (cyclones, tornades, mousson, *etc.*).

2. Ensemble des comportements acquis et caractéristiques d'une population.

3. Des éléments d'analyse inhérents à l'origine des problématiques actuelles sont présentés en annexe A.

du changement climatique (principalement dû à la production anthropique de gaz à effets de serre). Ce sujet fut le thème de nombreuses conférences scientifiques et autres sommets dans lesquels ont participé dirigeants et chefs d'État. Des résolutions furent alors prises dans le but de limiter l'impact anthropique sur la nature. Au niveau mondial, le premier accord caractéristique est le protocole de Kyoto⁴. Celui-ci a été traduit au niveau Européen sous la forme du « Paquet Climat Énergie », puis intégré au droit Français par le biais d'arrêtés et de directives. Afin de respecter les engagements pris, une concertation nationale a eu lieu dès 2007 : le Grenelle de l'environnement⁵. À noter que toutes ces décisions politiques se répercutent naturellement aux échelles subalternes. Au niveau national⁶, elles prennent la forme de directives, d'arrêtés, mais également de lois, de normes et autres incitations fiscales. Alors qu'au niveau régional, départemental et local cette répercussion apparaît dans les politiques menées, sous forme d'incitations économiques, de contraintes administratives ou à travers les infrastructures développées (*etc.*).

1.1.2 Cas spécifique de La Réunion

Conformément au contexte énergétique international, l'île de La Réunion doit faire face à une demande énergétique croissante⁷. Toutefois, cette région française ultramarine possède un contexte particulier du fait de l'insularité, de la sismicité et du climat tropical humide ; car ceux-ci limitent, dès lors, l'accès à l'énergie selon les méthodes métropolitaines classiques : utilisation de centrale nucléaire ou acheminement de l'électricité sur le réseau local depuis les régions voisines⁸ (les énergies renouvelables étant marginales et les énergies fossiles utilisées en appoint notamment lors des pics de consommation). Seule l'énergie électrique produite localement, *via* les Énergies Renouvelables⁹ (ENR) ou la combustion des énergies fossiles, sont accessibles¹⁰ ; de plus l'objectif actuel est l'indépendance énergétique¹¹ pour 2030 (donc 100% ENR). Par ailleurs, en tant que département français, l'île de La Réunion est également soumise aux problématiques énoncées dans la section précédente. Toutefois, du fait des spécificités locales (climat tropical humide entre autres), les répercussions ne sont pas exactement les mêmes. Par exemple, la réglementation thermique (RT2012) ne s'y applique pas, au profit de la RTAA-DOM¹².

Face à ces défis, diverses mesures et projets tels que « l'agenda 21 », « GERRI », « PETREL » ou « Ile verte » ont été lancés en vue de mobiliser les efforts de recherche et ainsi être à la pointe en matière d'environnement et de développement durable. En ce sens, l'île de La Réunion a été nationalement reconnue (et promue) « laboratoire des énergies renouvelables » lors de l'allocution du Président de la République Française, le 19 janvier 2010 à Saint-Pierre de La Réunion. Parmi les stratégies mises en place dans ces projets, se trouve la réduction de la consommation énergétique¹³, notamment *via* la régulation thermique du parc immobilier. En effet, avec un taux¹⁴ de 43,7% en 2010 [ARER, 2012] le secteur résidentiel est le poste le plus énergivore de

4. Lors du protocole de Kyoto signé en 1997, la France s'est engagée à stabiliser ses émissions de gaz à effet de serre sur la période 2008-2012 à leur niveau de 1990.

5. Il s'étend de 2007 à 2012, la première loi a été publiée début août 2009 redéfinissant les orientations nationales pour accélérer la diminution de la consommation énergétique par un facteur 4.

6. Citons en France la loi sur l'interdiction des décharges publiques, la norme ISO-9001 et le crédit d'impôt associé à l'installation de panneaux solaires par exemple.

7. L'inflation annuelle de la demande en électricité est de l'ordre de 5%, elle provient principalement de l'accroissement démographique soutenu et de l'élévation du niveau de vie.

8. Stratégie utilisée notamment pour la Bretagne et la Corse.

9. *Id est* : hydraulique, bagasse, solaire et éolien principalement (la géothermie et l'énergie thermique des mers sont à l'étude). À noter que la demande électrique dans les années 1970 était totalement fournie par la production hydraulique, contre 15% en 2011.

10. À noter qu'en 2011 le bouquet énergétique de l'île, concernant la production électrique, était composé à 30,2% d'énergies renouvelables et à 69,8% d'énergie fossile selon l'ARER.

11. L'île doit importer 100% des combustibles fossiles, soit 87% de ses besoins énergétiques globaux. À noter que l'augmentation des ENR a permis de diminuer le volume des énergies fossiles importées depuis 2005.

12. Réglementation Thermique Acoustique et Aérolique des Départements d'Outre-Mer.

13. Pour plus d'informations sur la consommation énergétique réunionnaise se reporter à l'analyse de SAVI-DAN et al. [2011] et aux publications de l'ARER.

14. Valeur en accord avec la moyenne nationale (*source* : ADEME).

l'île. De ce fait, la régulation thermique du parc immobilier¹⁵ est l'un des axes majeurs de la politique de développement.

En raison de la situation géographique de l'île (21°34' sous l'équateur), la surface des bâtiments la plus exposée aux sollicitations solaires est la toiture. La diminution de cet apport énergétique peut alors être effectuée *via* l'une des solutions suivantes :

- limiter le transfert de l'énergie absorbée par la paroi ;
- limiter l'absorption d'énergie par la paroi ;
- limiter l'intensité du rayonnement solaire atteignant la paroi.

Il est classiquement d'usage de recourir à la première solution, *via* l'ajout de matériaux sous la paroi, faisant office d'isolants thermiques conductifs (laines minérales, *etc.*), convectifs (lame d'air), radiatifs (parois minces réfléchissantes [MIRANVILLE, 2002]), inertiques sans changement de phase (bétons, *etc.*) ou inertiques avec changement de phase [GUICHARD, 2013] *etc.*. La seconde solution, quant à elle, est généralement mise en œuvre *via* l'utilisation de revêtements « blancs », réfléchissants, ou à film d'eau. Enfin, la troisième solution consiste à utiliser un élément de surtoiture (panneau photovoltaïque [BIGOT, 2011], toitures végétales, *etc.*).

Considérant le potentiel des toitures végétales, vis-à-vis des problématiques thermiques et plus généralement environnementales¹⁶, l'étude de cette solution a été choisie. En ce sens, la présente thèse a reçu le soutien financier de la région Réunion et du Fond Social Européen (FSE) afin de développer les connaissances relatives à l'aspect thermique des parois végétalisées.

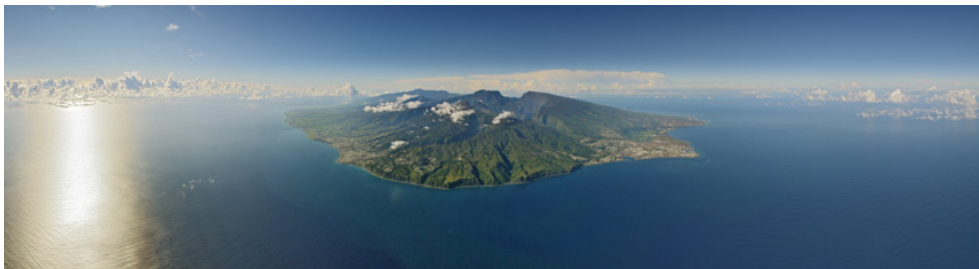


Figure 1.1 – Vue aérienne de l'île de La Réunion. (Crédit : Hervé DOURIS)

15. Afin de limiter le chauffage dans « les hauts » de l'île et la climatisation dans « les bas ».

16. Pour plus d'informations, se reporter à l'annexe I, reproduction de la communication du Forum des Jeunes Chercheurs 2011 de l'Université de La Réunion.

1.2 Les parois végétalisées

Au cours des deux derniers siècles, les problématiques sanitaires et environnementales des villes se sont imposées¹⁷. Les diverses solutions alors proposées ont souvent été partielles. À l'heure actuelle, due à l'augmentation des densités et superficies urbaine, ces problématiques se complexifient, constituant de nouveaux défis. Parmi ceux-ci se trouve l'effet d'îlot urbain, la pollution de l'air, les problèmes de santé publique [McCARTHY et al., 2001] mais aussi les difficultés tels que la gestion des eaux pluviales et les besoins énergétiques croissants. Les parois végétalisées constituent potentiellement une solution partielle à ces maux [BERARDI et al., 2014].

1.2.1 Présentation succincte

1.2.1.1 Constitutivement

Succinctement¹⁸, une paroi végétalisée horizontale (*i.e.* PCV_H) définit toute paroi dont l'inclinaison varie de 0° (horizontale) à 30°, et dont la composition intègre une couche végétale vivante, quel que soit sa position dans le complexe. Les toitures végétales sont un cas particulier, un exemple typique de PCV_H. La figure 1.2 illustre cette notion pour une paroi composée de trois couches : structure, substrat et végétation.

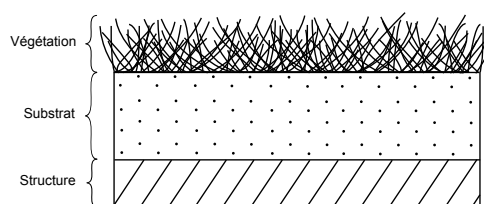


Figure 1.2 – Illustration d'une PCV_H

1.2.1.2 Historiquement

Les PCV_H et plus particulièrement les toitures végétales sont connues de diverses civilisations depuis les temps immémoriaux. Historiquement, leur construction se fait de manière traditionnelle depuis plusieurs millénaires dans la zone paléarctique. On en retrouve les traces dans différents pays scandinaves, ainsi qu'en Europe, en Mongolie et en Turquie. À noter que le principe constructif développé au cours de ces millénaires fait toujours partie des traditions amérindiennes d'Amérique du Nord¹⁹. À l'heure actuelle, diverses PCV_H ont été développées afin de s'adapter aux besoins contemporains, toutefois le principe reste similaire.

1.2.1.3 Scientifiquement

L'intérêt scientifique et technique pour les PCV_H a semble-t-il débuté suite à la prise de conscience induite par le premier choc pétrolier (1973). Depuis, de nombreuses expériences ont été conduites en Europe (Allemagne, Pays-Bas, Suisse et pays scandinaves notamment). Toutefois, les connaissances scientifiques à leurs égards restent faibles. Pourtant, les PCV_H représentent un champ disciplinaire très vaste ; car à l'interface de sciences telles que les transferts de masse et de chaleur, de la mécanique des fluides, des milieux poreux et continus, de la biologie végétale, mais aussi la pollution de l'air et de l'eau, de l'écologie, *etc.*

Selon une étude portant sur 300 articles entre 1960 et 2012 [BLANK et al., 2013], les PCV sont étudiées par 32 disciplines différentes, principalement en physique appliquée (physique du bâtiment notamment) et en sciences écologiques et environnementales (biodiversité, biologie végétale,

17. Des éléments d'analyse inhérents à l'origine des problématiques actuelles sont présentés en annexe A.

18. Pour plus d'information sur la nomenclature des « PCV » se reporter au chapitre II, section 1.

19. Celles-ci consistent en un épais mélange de terre et de végétaux herbacés enracinés créant un complexe isolant, étanche à l'air et à l'eau, résistantes au vent et au feu. Ces lourdes toitures exigent de solides charpentes et une couche protectrice (écorce de bouleau) placée entre le complexe végétalisé et la charpente afin que cette dernière ne subisse pas les méfaits de l'humidité.

botanique), avec un intérêt croissant pour l'aspect environnemental alors que l'aspect architectural tend à diminuer. Les études sont effectuées à 66% par les États-Unis d'Amérique et de l'Union Européenne, et 20% par l'Asie (pour un total de 37 pays en 2012). Elles concernent principalement les PCV en climat tempéré.

1.2.1.4 Réglementairement

Répondant à des volontés politiques, certains pays (ou villes) ont développé des réglementations afin de favoriser et encadrer l'usage des PCV_H. Voici quelques exemples :

— *Dans le monde* —

Au Japon, où la ville de TOKYO exige que toute construction occupant plus de 1000 m² de terrain soit couverte de végétaux sur 20% de sa surface afin de limiter l'effet d'îlot urbain [PECK, 2001]. Aux États-Unis d'Amérique, plusieurs grandes villes comme CHICAGO, PORTLAND ou NEW YORK ont mis en place des systèmes d'incitations fiscales ou de subventions afin de développer l'utilisation des PCV_H [PECK et CALLAGHAN, 1999]. Au Canada, l'institut de recherche IRC-CNRC, membre d'un consortium de recherche permanent (le « Roof Garden Consortium »), a publié un guide de conception des systèmes de toiture-jardin sous les climats froids. La province du Québec a également mis en place une incitation financière spécifique pour promouvoir le développement de l'usage des PCV.

— *En Europe* —

En Suisse, la végétalisation passe par la réglementation, elle est obligatoire sur tout nouveau toit plat présentant une inclinaison adaptée à leur implantation. L'Allemagne a également lancé un programme de développement des PCV_H à travers la création de standards environnementaux (dès²⁰ 1982 [FFL, 2002]) et de lois relatives à la construction [KÖHLER et KEELEY, 2005] mais aussi d'aides gouvernementales [BOIVIN, 1992] ; Ceci principalement à BERLIN dès 1980. En Angleterre un guide des bonnes pratiques constructives a également été créé [GRO, 2011] par l'industrie des toitures végétales en partenariat avec le centre de recherche²¹ dédié aux toitures végétalisées de l'université de Sheffield.

— *En France* —

D'un point de vue réglementaire, les PCV_H de type intensif répondent au DTU 43.1 alors que les PCV_H de type semi-intensif et de type extensif ne font l'objet d'aucune norme NF DTU ou d'aucun avis technique [ADIVET et al., 2007]. Toutefois des règles constructives ont été établies en novembre 2007 par des professionnels du secteur²² afin de combler cette lacune [ADIVET et al., 2007]. De plus, certaines villes telles que PARIS ou GRENOBLE ont prévu les PCV_H dans leurs plans locaux d'urbanisme [SABRE et BULTEAU, 2011]. Enfin, en mars 2015 l'Assemblée Nationale a adopté le projet de loi dit « organique » portant, entre autres, sur la végétalisation des centres commerciaux²³.

— *À La Réunion* —

20. La « Landscaping and Landscape Development Research Society », actualisé régulièrement ce guide des bonnes pratiques constructives. La version de 2002 elle était considérée comme la norme la plus avancée sur les systèmes de toiture-jardin selon [LIU, 2005].

21. Il s'agit du centre de recherche anglais : « The Green Roof Centre ».

22. Il s'agit de l'ADIVET, le CSFE, le SNPPA et l'UNEP.

23. Loi organique, section 6 bis « Biodiversité en milieux urbain et périurbain ». Article X. Après le premier alinéa de l'article L. 111-6-1 du code de l'urbanisme, il est inséré un alinéa ainsi rédigé : « Pour les projets visés par l'article L. 752-1 du code de commerce, le document autorise la construction de nouveaux bâtiments uniquement s'ils intègrent sur l'ensemble de leurs toitures, et de façon non exclusive, soit des procédés de production d'énergies renouvelables, soit un système de végétalisation basé sur un mode cultural garantissant un haut degré d'efficacité thermique et d'isolation et favorisant la préservation et la reconquête de la biodiversité. » [ASSEMBLÉE NATIONALE, 2015].

Malgré des conditions climatiques particulières²⁴, il n'existe aucune réglementation spécifique visant à favoriser ou encadrer la construction de PCV_H. Seules peuvent s'appliquer les normes et règles constructives métropolitaines.

1.2.2 Une solution pour diverses problématiques

Les parois végétales (nommées aussi PCV) représentent une solution vis-à-vis des problématiques urbaines définies précédemment, mais également vis-à-vis des objectifs d'autonomie énergétique réunionnais. De plus, elles possèdent divers atouts, répartis dans différents domaines.

1.2.2.1 Solution à la problématique urbaine

Une manière de lutter contre les maux et les difficultés inhérentes à l'urbanisation des territoires²⁵, consiste à réintroduire la nature au sein des villes. Toutefois, l'espace disponible à cet effet est plus que limité, principalement pour des raisons techniques, mais surtout en raison des considérations financières (rentabilité du mètre carré). Face à ce problème, une solution consiste à végétaliser différemment ; à introduire la nature sous un autre angle. Une manière d'envisager une telle introduction consiste à végétaliser en surface les bâtis (murs et toitures) ; *i.e.* développer l'utilisation des PCV.

Considérant le faible coût de cette solution simple et efficace, de nombreuses grandes villes et mégalo-les telles que NEW YORK, BERLIN ou TOKYO (*etc.*), ont fait le choix de développer cette technologie.

1.2.2.2 Solution aux objectifs réunionnais

Localement, afin d'accéder à l'objectif des « 100% d'autonomie énergétique à l'horizon 2030 pour La Réunion²⁶ », des avancées technologiques et comportementales devront être opérées. Le secteur résidentiel est à l'origine de plus de 43,7% de la consommation énergétique en 2010, il représente un poste clef quant à l'atteinte de cet objectif. En ce sens, les toitures végétalisées sont une solution de choix. En effet, l'utilisation d'une telle technologie, adaptée au contexte local (présence d'environ 300 microclimats²⁷), permettrait de contribuer significativement à la réduction de la consommation énergétique de l'un des postes les plus énergivores de l'île. De plus, elles apportent aux divers désagréments quotidiens des réponses écologiques et passives, telles que l'isolation naturelle (thermique et acoustique) du bâti, la retenue et le déphasage des eaux de pluies, la réduction des particules contenues dans l'air, où bien la réduction de la surchauffe urbaine, à laquelle les bas de La Réunion sont si fortement soumis.

1.2.2.3 Solution ayant de nombreux atouts

Bien que seul l'aspect thermique soit traité dans ces travaux, il est à noter que plus généralement, cette solution possède de nombreux atouts. En voici les principaux [BERARDI et al., 2014; LODER, 2014] :

24. Présence d'un climat tropical humide au niveau de la mer et tempéré en altitude (zone cyclonique).

25. Des éléments d'analyse inhérents à l'origine des problématiques actuelles sont présentés en annexe A.

26. Également annoncé par Monsieur le Président de la République Française, lors de l'allocution le 19 janvier 2010 à Saint-Pierre de La Réunion.

27. L'île de La Réunion est le lieu possédant la plus grande densité de micro-climat au monde.

Environnement : préservation des habitats et biodiversité ;

Eau : rétention et filtration ;

Air : filtration ;

Durabilité : durée de vie de la membrane d'étanchéité ;

Hygrométrie : humidification de l'air ambiant ;

Thermique : protection et inertie ;

Acoustique : protection ;

Cycle de vie : bilan avantageux ;

Esthétique : communément accepté comme agréable ;

Psychologie : favorise l'équilibre mental ;

Social : lieu de vie et d'échange ;

Économie : faible coût et cultures ;

Emploi : génère un secteur d'activité ;
etc.

Contexte et état de l'art

Section 2

Étude bibliographique

Depuis les années 1970 de nombreuses études ont porté sur les toitures végétales horizontales¹ (PCV_H). Concernant celles ayant attiré à l'impact thermique, deux approches se distinguent : expérimentale et théorique. La première consiste à instrumenter une paroi végétalisée, dans un environnement contrôlé ou naturel, afin d'en déterminer l'impact thermique. La seconde consiste à créer un modèle prédictif, prenant en entrée les conditions météorologiques et la description du système, afin d'obtenir généralement la température de surface sous la PCV_H. À noter que certaines de ces études présentent les deux approches ; ceci principalement lors d'une confrontation modèle/mesure dans le cadre d'une procédure de validation expérimentale. Ces deux approches sont détaillées dans les sections suivantes.

2.1 Approche expérimentale

Les études utilisant l'approche expérimentale peuvent être caractérisées selon deux axes : le type d'expérience effectué et les résultats obtenus. La présente section synthétise en ce sens les travaux internationaux observés.

2.1.1 Types d'expériences

L'expérimentation permet de tester, comprendre et interpréter le comportement ainsi que les phénomènes physiques inhérents aux PCV. Elle permet également d'obtenir aisément des données de qualité permettant de valider les modèles créés.

Concernant l'expérimentation des parois complexes végétalisées horizontales (PCV_H) diverses études ont été menées. Celles-ci peuvent être regroupées en fonction du mesurande principal souhaité. Elles sont au nombre de trois :

1. L'impact de la PCV_H sur la réduction du flux de chaleur traversant la paroi ;
2. L'obtention de la résistance thermique équivalente au système complexe que compose la PCV_H ;
3. La quantification de l'évapotranspiration associée à la PCV_H en fonction du climat.

À noter que l'expérimentation peut également être caractérisée par ses conditions environnementales : contrôlées ou réelles. La présente sous-section a pour objectif de décrire succinctement ces expérimentations.

1. Pour plus d'information sur la nomenclature des « PCV » se reporter au chapitre II, section 1.

2.1.1.1 Le flux de chaleur

Il semble que les premières mesures concernant les transferts thermiques au sein des PCV_H furent effectuées en Allemagne durant les années 1970. Ces études permettaient de comparer l'impact thermique d'une PCV et d'une toiture bitumineuse classique à travers quelques mesures de température [HOESCHELE et SCHMIDT, 1977]. Les premières études basées sur la réduction du flux de chaleur à travers la paroi sont apparues quelques années plus tard. Elles étaient principalement menées sur des toitures végétales de type intensif [MINKE et WITTER, 1982; LIESECKE et al., 1989; CHRISTIAN et PETRIE, 1996].

Plus récemment, en Amérique du Nord, des études basées sur des PCV_H de type extensif ont permis de comparer les performances thermiques de ces installations sur différentes périodes. Allant de quelques semaines durant l'été à deux ans, la réduction moyenne du flux due à la présence de la PCV a varié de 18% à 75%. Cette importante plage de variation provient du fait que les expérimentations ne sont pas identiques : il y a des différences entre les montages expérimentaux, les taux de couverture des plantes, les bâtiments instrumentés et les conditions climatiques observées [BASS et BASKARAN, 2003; LIU et BASKARAN, 2004; LIU et MINOR, 2005; LIU et BASKARAN, 2003; WONG et al., 2003a; DENARDO, 2003; SONNE, 2006; HIEN et al., 2007].

Des études ont montré que la végétation de la PCV_H apporte une réduction du flux de chaleur supplémentaire significative, comparée à une paroi identique sans végétation (donc ayant le substrat à nu) [WONG et al., 2003a]. Cette dernière étude conclut que la différence est due à l'ombre apportée par les plantes, car le flux de chaleur la nuit était quasiment le même pour les deux montages expérimentaux.

Une seconde étude est arrivée à des conclusions similaires par l'analyse d'une toiture ayant un substrat à nu, irrigué et ombragé à l'aide d'un dispositif ajustable [PEARLMUTTER et ROSENFELD, 2008].

Selon une troisième étude, il semblerait que ce ne soit pas uniquement l'ombre portée de la végétation qui soit la cause de la réduction du flux de chaleur à travers la paroi, mais également l'évapotranspiration due aux plantes. Cette analyse a pu être menée grâce à des expériences en environnement contrôlé [TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2009b].

De nombreuses études ont été menées afin de comparer l'influence thermique des PCV_H à celle de toitures dites « traditionnelles » (principalement des toitures bitumineuses). La différence la plus importante se situe au niveau de la température de surface de la toiture. Elle induit divers impacts. Localement d'une part, car le flux de chaleur qui traverse la paroi, ainsi que la température de l'air extérieur au contact de cette surface, sont alors affectés. Globalement d'autre part, car à l'échelle de la ville, la modification des températures de surface, et donc d'air extérieur à son contact, influe sur l'effet d'îlot urbain.

2.1.1.2 La résistance thermique

Utilisant sous certaines conditions² l'équation de FOURIER, il est possible de déterminer la valeur de la résistance thermique de la PCV_H. Cette approche de l'impact de la végétalisation de la toiture sous forme de résistance, et non de flux, permet d'obtenir une grandeur caractéristique du système étudié. Car cette valeur est intrinsèquement liée à la composition de la PCV_H. Elle est également dépendante des données météorologiques (donc fonction du temps). Toutefois, ce lien est subordonné aux propriétés des divers composants de la PCV_H, tel que les propriétés radiatives des plantes et du substrat, la capacité du substrat à absorber l'eau précipitée, la capacité de thermorégulation de la végétation par le biais de l'évapotranspiration (*etc.*) [LIESECKE et al., 1989].

La notion de dépendance au temps, d'évolutivité³, des propriétés thermiques associées au

2. Parmi lesquels : régime quasi-statique, flux de chaleur perpendiculaire à la paroi, système homogène et isotrope, *etc.*

3. Due de manière directe (fraction massique d'eau dans le substrat) ou indirecte (transpiration des plantes)

système, induit l'impossibilité de caractériser ce dernier par une résistance thermique constante, contrairement aux matériaux conventionnels⁴. Suivant cette approche, des études expérimentales ont mesuré des résistances thermiques associées à des toitures végétalisées (R_{PCV_h}) extensives et intensives. Les valeurs obtenues varient respectivement de 10.2 à 27.2 $m^2.K.W^{-1}$ pour le type extensif [WONG et al., 2003a; BELL et SPOLEK, 2009; TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2009a] et de 28.4 à 113.5 $m^2.K.W^{-1}$ pour le type intensif [WONG et al., 2003a; MINKE et WITTER, 1982].

La principale difficulté associée à cette approche réside dans le caractère dynamique du système, contraignant ainsi les calculs nécessaires à l'obtention de la résistance thermique [PERINO et al., 2003a,b]. Au-delà des conditions climatiques, la résistance équivalente est également impactée par l'évolution de la végétation (développement, parasites, *etc.*) ou bien par d'autres facteurs tels que la pollution. En effet, une irrigation de la PCV_H par des eaux usées peut diminuer notablement sa résistance thermique [OULDOUKHITINE et al., 2014].

2.1.1.3 L'évapotranspiration

Diverses études ont montré que la teneur en eau dans le substrat joue un rôle important dans l'impact des PCV_H sur le flux thermique traversant la paroi et ceci principalement par le biais de l'évapotranspiration [LIESECKE et al., 1989; LIU et BASKARAN, 2004; LAZZARIN et al., 2005; HIEN et al., 2007].

L'évapotranspiration est la combinaison des processus d'évaporation (de perte en eau par le substrat) et de transpiration (de perte en eau par les plantes). L'importance relative entre les phénomènes d'évaporation et de transpiration n'a pas encore été identifiée [FENG et al., 2010]. Comme l'indique la littérature⁵, il existe globalement trois méthodes afin d'obtenir une mesure locale⁶ de l'évapotranspiration [RANA et KATERJI, 2000] : hydrologiques, micrométéorologiques, et basées sur la physiologie des plantes.

2.1.1.3.1 Hydrologique

Les approches hydrologiques sont basées sur la mesure de la teneur en eau du substrat. La prise en considération des phénomènes de précipitations et de percolation (bilan de masse) permet ensuite d'obtenir une estimation de l'évapotranspiration [NOURI et al., 2013]. Deux approches sont couramment utilisées pour obtenir la teneur en eau du substrat :

— Lysimètre —

L'utilisation d'un lysimètre permet de mesurer l'évapotranspiration en continu. Placé sous une colonne de substrat, il mesure directement l'évolution du poids de cette dernière. Les fluctuations relevées sont alors associées aux variations de la masse d'eau présente. La précision est de l'ordre de 10 à 20% pour un pas de temps de l'heure. De plus, cette approche est généralement peu adaptée aux végétalisations poly-espèces et globalement peu aisée à mettre en œuvre [NOURI et al., 2013].

— Sondes réflectométriques —

L'estimation de l'évapotranspiration est obtenue par le biais de mesures à l'aide de sondes réflectométriques. Le principe de mesure est basé sur le fait que la vitesse de propagation d'une onde dans le sol est fonction de sa composition, notamment la présence d'ions et de molécules

aux conditions climatiques.

4. Tel que l'acier, la laine de verre, le béton, *et caetera*.

5. RANA a synthétisé les approches associées à l'évapotranspiration, qu'elles soient expérimentales ou numériques [RANA et KATERJI, 2000].

6. L'évapotranspiration peut également être déterminée à plus grande échelle *via* l'utilisation de clichés satellitaires depuis les années 1990 [NOURI et al., 2013].

dipolaires (*i.e.* l'eau). Cette technologie permet des mesures au pas de temps de l'heure⁷.

Dans les études recensées, la plupart des mesures concernant le taux d'évapotranspiration sont effectuées par les méthodes hydrologiques [REZAEI, 2005; VANWOERT et al., 2005; BERGHAGE et al., 2007]. L'utilisation du lysimètre est l'approche la plus courante [SCHMIDT, 2003; KOEHLER, 2004; VANWOERT et al., 2005; BERGHAGE et al., 2007] toutefois, le calcul du bilan hydrique par le biais de sondes réflectométriques est également utilisé [TAKEBAYASHI et MORIYAMA, 2000; VANWOERT et al., 2005; BERRETTA et al., 2014].

2.1.1.3.2 Micro-météorologique

Cette seconde approche est basée sur des mesures locales des conditions météorologiques. Toutefois, considérant les hypothèses sous-jacentes nécessaires à l'instrumentation, cette approche ne peut être utilisée que sur des grandes surfaces planes ayant une végétation uniformément répartie [RANA et KATERJI, 2000]. Les trois approches principales sont présentées ci-dessous. Elles définissent toutes le flux latent ($W.m^{-2}$) sous la forme : $L_v E$, où L_v est l'enthalpie de vaporisation et E la masse d'eau évapotranspirée.

— Bilan énergétique et ratio de BOWEN —

Une méthode indirecte de mesure de l'évapotranspiration consiste à effectuer un bilan énergétique, tel que : $R_n + G = H + L_v E$. Où R_n caractérise l'irradiation nette, G le flux thermique dans le sol, H le flux d'adduction⁸ sur la canopée et $L_v E$ le flux associé au changement de phase (évapotranspiration). Définissant le ratio de BOWEN : $\beta = H/L_v E$, le bilan permet d'exprimer le flux latent de la manière suivante : $L_v E = [R_n + G]/[1 + \beta]$. Où β peut être mesuré par le ratio $\beta = \zeta \Delta T / \Delta P$, avec ζ la constante psychrométrique. Les différences de températures et de pressions, quant à elles, sont prises à deux niveaux distincts (canopée et air).

Simple et peu onéreuse, cette approche nécessite un système idéalement homogène et une mesure précise des valeurs R_n et G afin d'obtenir une erreur minimale [NOURI et al., 2013]. L'erreur associée est estimée à 10% [RANA et KATERJI, 2000].

— Méthode aérodynamique —

Cette méthode indirecte est basée sur l'hypothèse d'un flux latent corrélé à la pression partielle en eau dans la couche atmosphérique au contact de la canopée. Ainsi : $L_v E = -L_v \rho_a u^* q^*$, où u^* et q^* sont obtenus respectivement *via* les profils de vent et d'humidité spécifique dans l'air. La principale difficulté de cette approche réside dans la mesure de la pression partielle en eau à différentes hauteurs au dessus de la canopée.

Considérant ceci, une seconde approche a été développée à partir d'un bilan énergétique, tel que : $R_n + G = H + L_v E$. Dans lequel $H = -\rho_a c_p u^* T^*$, où c_p est la capacité calorifique massique et T^* un facteur obtenu à partir du profil de température.

Ces deux approches ont une précision augmentant avec le nombre de points de mesure définissant les profils (vitesse de vent et température ou humidité) [RANA et KATERJI, 2000].

— Covariance des turbulences —

Cette approche statistique (utilisant la décomposition de REYNOLDS) est permise grâce à aux mesures⁹ de la vitesse verticale des masses d'air et de la variation de leurs concentrations en vapeur d'eau. Elle est basée sur diverses hypothèses telles qu'une vitesse verticale moyenne nulle des masses d'air, un flux d'air turbulent, un terrain horizontal et uniforme (entre autres)

7. La résolution de cette approche vis-à-vis de l'évapotranspiration permet difficilement d'observer une évolution plus fine que le pas de temps de l'heure.

8. Adduction : ensemble des autres flux thermiques basés sur un échange de type sensible tel que la convection, l'irradiation GLO, mais aussi l'impact sur le flux thermique de l'activité métabolique de la plante, la respiration, la photosynthèse, *et ceaterra*.

9. Mesure ponctuelle, au dessus de la canopée, à haute fréquence ([5;40] Hz).

[BURBA et ANDERSON, 2010]. Elle s'exprime ainsi : $L_v E = L_v \cdot \text{cov}(w, q)$, où w est la vitesse d'air verticale et q l'humidité spécifique. Cette approche est l'une des plus directes, mais nécessite une surface expérimentale importante afin de limiter les effets de bords.

Bien que directe, l'approche par covariance des turbulences est peu utilisée dans les études sur les PCV_H (contrairement aux études agronomiques). Ceci est certainement dû à l'importante surface nécessaire à son utilisation. N'ayant pas cette contrainte, certaines études utilisent l'approche basée sur un bilan énergétique afin de déterminer le flux thermique associé à l'évapotranspiration [TAKEBAYASHI et MORIYAMA, 2000; SCHMIDT, 2003; KOEHLER, 2004].

2.1.1.3.3 Physiologie des plantes

Les trois approches basées sur la physiologie des plantes sont les suivantes :

— Le débit de sève —

Méthode d'obtention, *in situ* et peu onéreuse, de la transpiration par mesure du débit de la sève dans la plante. Plus précisément, celle-ci est basée sur la caractérisation du mouvement du front thermique associé au débit d'eau dans le xylème¹⁰ [ALLEN et al., 2011]. Cette approche (telle quelle) néglige les pertes par évaporation dues au substrat. De plus, elle définit la transpiration pour une espèce végétale particulière (méthode peu adaptée si il y a un grand nombre d'espèces en présence).

— La quarantaine —

Cette méthode, également appelée « système de la chambre » consiste à créer un compartiment translucide (idéalement transparent) enfermant (en partie) la plante. La zone créée possède une ouverture de diamètre limité afin qu'il puisse y avoir un échange entre l'air interne et l'air externe. Ainsi il est possible de mesurer la différence de pression partielle en eau entre l'air dans l'enceinte créée et l'extérieur. Les résultats obtenus possèdent une incertitude de l'ordre de 10% d'après la littérature [RANA et KATERJI, 2000]. Toutefois, cette méthode pose quelques soucis concernant la similarité du système étudié par rapport à un système en conditions réelles. En effet, elle modifie l'irradiation solaire ainsi que la vitesse du vent et la température au contact des feuilles.

— La porométrie —

Cette méthode est effectuée *via* un poromètre, appareil qui consiste à emprisonner un petit volume d'air au contact de la feuille puis à mesurer l'humidité relative de l'air en fonction des sollicitations. Il existe deux types d'approches, en laboratoire ou *in situ*. Bien plus adaptée aux besoins, l'approche *in situ* (*via* un poromètre portable) est aussi moins précise : une erreur de $\pm 3\%$ sur l'humidité relative induit une erreur de $\pm 18\%$ sur le résultat. Comme toutes les approches physiologiques, cette méthode permet de mesurer spécifiquement la transpiration, elle a également l'avantage d'indiquer la résistance stomatique, donnée nécessaire pour la validation des modèles de transpiration de type multiplicatifs¹¹.

Bien que particulièrement peu aisées à mettre en œuvre, quelques études utilisent la méthode de la quarantaine (ouverte ou fermée) [VAN DE GRIEND A., 1994; ALUWIHARE et WATANABE, 2003], mais très peu utilisent celle du débit de sève. Enfin, quelques études utilisent la porométrie [ALEXANDRI et JONES, 2007].

10. Vaisseaux conduisant la sève brute (minérale) et constitués de faisceaux de cellules mortes alignées et entourées de lignine.

11. Notion abordée dans le tableau 2.6.

2.1.1.3.4 *synthèse*

Quelle que soit la méthode utilisée, l'obtention de l'évapotranspiration est importante, car son impact sur la réduction des transferts thermiques n'est pas négligeable. En effet, une étude annonce pour une PCV_H sèche (humide) en été une réduction de 12% (respectivement 25%) du flux de chaleur traversant la paroi témoin [LAZZARIN et al., 2005].

Table 2.1 – Synthèse des approches expérimentales pour la mesure de l'évapotranspiration.

Type	Méthode	Remarques Méthode	Remarques Type
Hydrologique	Lysimètre	Approche globale, mesure continue de la masse du substrat (et plantes) variations dues à l'eau. Peu aisé à mettre en œuvre. $\Delta t = 1$ heure. Erreur : $\pm 10\%$ à $\pm 20\%$.	Approche indirecte basée sur la mesure de l'eau dans le substrat.
	Sondes réflectométriques	Approche locale, mesure continue de la fraction volumique d'eau liquide (ω). $\Delta t = 1$ heure. Erreur capteur : $\pm 2,5\%$.	
Micro-Météorologique	Bilan énergétique et ratio de BOWEN	Approche locale basée sur une constante : β (rapport des flux sensibles sur latents). Mesure continue. $\Delta t = 1$ minute. Erreur : $\pm 10\%$.	Approche indirecte basée sur la mesure des paramètres météorologiques dans la canopée ou au-dessus (T, HR, vent).
	Méthode aérodynamique	Approche locale basée sur la mesure de la pression partielle en eau à différentes hauteurs dans la canopée. Mesure continue. $\Delta t = 1$ minute.	
	Covariance des turbulences	Approche globale (statistique) basée sur les mesures continues de vitesse d'air et d'humidité spécifique au dessus de la canopée. $\Delta t = 1$ minute. Grande surface expérimentale nécessaire.	
Physiologique	Le débit de sève	Approche locale (peu onéreuse) basée sur la mesure du débit de sève dans les branches de la plante. Mesure continue.	Approche directe localisée sur la plante. Mesure de l'eau transpirée.
	La quarantaine	Approche locale. Influence les conditions environnementales. Mise en œuvre au niveau de la canopée. Mesure ponctuelle. $\Delta t = 1$ minute. Erreur : $\pm 10\%$.	
	Poromètre	Approche locale. Faible influence sur les conditions environnementales. Mise en œuvre au niveau de la feuille. Mesure ponctuelle. $\Delta t = 1$ minute. Erreur : $\pm 18\%$.	

La caractérisation de l'évapotranspiration peut donc être faite selon les trois types d'approches présentées. Que celles-ci soient dans des conditions réelles ou en laboratoire. Les études en laboratoire offrent la possibilité de contrôler l'environnement dans lequel se déroule l'expérimentation. Cette approche est utile afin d'étudier spécifiquement un phénomène dans un contexte météorologique précis.

2.1.1.4 *Expériences spécifiques présentes en laboratoire*

Les expérimentations en laboratoire diffèrent des expériences en conditions réelles par la possibilité de contrôle des paramètres environnementaux. Cette approche permet ainsi d'isoler « artificiellement » un phénomène particulier par le biais du contrôle des sollicitations associées (irradiation, humidité relative, *et caetera*). Dès lors, une telle approche pose la question du réalisme des conditions environnementales recréées.

Beaucoup annoncent une certaine difficulté concernant la reproduction des sollicitations présentes lors d'expérimentations en conditions réelles. Il s'agit par exemple de l'irradiation. Si simulée par une lampe infrarouge [ONMURA et al., 2001], le spectre d'émission est alors généra-

lement trop faible dans le domaine du visible et du RPA¹² et trop élevé dans le domaine spectral des infrarouges ; Si elle est simulée par des lampes à décharges de haute intensité [BELL et SPOLEK, 2009], la densité de flux est généralement trop faible¹³.

Certaines études utilisent la quarantaine afin d'évaluer la réduction du transfert thermique à travers la paroi due à la végétalisation d'un toit. En pratique, des petites chambres de l'ordre du mètre carré sont utilisées avec une irradiation de 500 W.m^{-2} sur différents types de plants [FANG, 2008]. Il ressort de cette expérimentation une réduction de la température de la surface de la toiture et de l'air environnant lorsque la végétation est présente.

D'autres études ont utilisé une soufflerie afin d'analyser l'effet des pertes thermiques par évaporation sur la PCV_H [ONMURA et al., 2001], ou bien de calculer les résistances thermiques associées à divers échantillons de PCV_H [BELL et SPOLEK, 2009]. Certaines d'entre elles ayant combiné l'utilisation d'une soufflerie et d'un lysimètre afin d'obtenir le taux d'évaporation de l'eau contenue dans le substrat [YAMANAKA et al., 1997]. Des études combinent la soufflerie, le lysimètre et la quarantaine (fermée) afin d'étudier le transfert thermique, et caractériser la résistance équivalente. Elles ont généralement une surface de l'ordre du mètre carré et une irradiation proche de 100 W.m^{-2} [OULDBOUKHITINE et al., 2014]. Il en a été déduit que l'évapotranspiration est l'un des mécanismes les plus influents sur le transfert thermique à travers la paroi [ONMURA et al., 2001].

Pour conclure, ces études représentent une base vers des expérimentations dont le contrôle est plus précis. Notamment concernant le réalisme de la simulation des conditions environnementales¹⁴. De plus, aucune de ces études ne fût en mesure d'obtenir continûment¹⁵ l'évolution de l'évapotranspiration, variable ressortant de ces études comme étant cruciale dans les processus de transferts massiques et thermiques associés à la PCV_H.

2.1.1.5 Synthèse typologique

Les diverses études expérimentales en laboratoire ou en conditions réelles portant sur la caractérisation thermique des PCV_H se sont principalement focalisées sur trois aspects :

1. Le transfert thermique à travers la paroi ;
2. La résistance associée à la PCV_H ;
3. L'évapotranspiration.

L'aspect utilisé est fonction de la finesse de la caractérisation souhaitée pour la PCV_H étudiée. Il ressort de ces approches que l'évapotranspiration est l'un des phénomènes les plus complexes à instrumenter sur une PCV. De plus, il ne semble pas y avoir d'étude ayant permis de mesurer continûment les transferts de masse et d'énergie les plus importants. Ceci représente une difficulté à surmonter dans le but de développer et de valider un modèle décrivant précisément les transferts thermiques au sein d'une PCV_H.

Enfin, ces études démontrent que les PCV_H peuvent réduire le transfert thermique à travers la paroi. Cette notion sera développée plus amplement dans la section suivante.

12. RPA : définit le domaine spectral utilisé par la photosynthèse. Acronyme associé à « Région Photosynthétiquement Active ».

13. De l'ordre de 100 W.m^{-2} [BELL et SPOLEK, 2009]. En comparaison, sous les tropiques l'irradiation solaire dépasse souvent les 1000 W.m^{-2} (valeur standard utilisée pour la définition de la puissance de référence des panneaux photovoltaïques).

14. Réalisme de l'intensité de chacune des sollicitations prises individuellement ainsi que le réalisme de leurs associations.

15. Avec une précision permettant un pas de temps de l'ordre de la minute.

2.1.2 Les résultats expérimentaux

Cette section présente les principaux résultats expérimentaux associés aux transferts thermiques à travers une PCV_H.

2.1.2.1 Impact sur les températures

La présence d'une PCV_H agit sur la température de surface du toit. Elle permet notamment d'en réduire considérablement la variabilité quotidienne et la température moyenne.

— *La variabilité quotidienne* —

D'après CONNELLY [CONNELLY et LIU, 2005], au cours d'un mois d'automne¹⁶, la variabilité de ces températures est fortement impactée. Elles sont de 32°C, 3°C et 1.5°C, respectivement pour une toiture bitumineuse standard (grise claire), une PCV_H épaisse de 75 mm et une PCV_H épaisse de 150 mm. LIU [LIU, 2003] confirme cette tendance à travers une étude de 2 ans¹⁷ durant laquelle la PCV_H réduit la variabilité moyenne de la température de 45°C à 6°C en été.

— *La température moyenne* —

Concernant la température moyenne, la présence de PCV_H provoque une température moyenne de surface supérieure à 30°C uniquement 3% du temps au cours des deux ans d'études. Ce résultat représente une réduction du flux de plus de 47% comparativement à une toiture bitumineuse classique.

— *Analyses descriptives* —

Bien que la température soit la variable représentant le plus finement l'état physique et énergétique du système, cette grandeur est peu utilisée¹⁸ dans les analyses descriptives des systèmes testés. Effectivement, bien qu'étant une variable d'état, la température ne rend pas compte du transfert thermique, du flux énergétique traversant la paroi. L'approche principale dans les études thermiques associées aux PCV consiste à apporter une information quant à l'isolation inhérente à la présence de celle-ci, donc à la réduction du flux thermique associé.

Une approche sous forme de flux permet l'analyse directe de la répartition énergétique selon les phénomènes physiques, ce que ne permet pas une représentation *via* les températures.

2.1.2.2 Répartition des flux énergétiques

— *Sensibilités globales* —

Des études expérimentales ont permis de pondérer l'importance des différents phénomènes de transfert inhérents à la PCV_H (ou sensibilité). Cette pondération s'effectue par rapport à l'irradiation solaire (ϕ_{I_r}). Les figures 2.1a et 2.1b expriment cette sensibilité pour une PCV_H semi-intensive¹⁹ localisée à Vicenza (nord-est de l'Italie) en environnement naturel, sous un climat de type méditerranéen (Cfa selon la classification de Köppen).

Il apparaît que pour ce climat (Cfa), quelle que soit la saison, la répartition des flux thermiques (rapportés à l'irradiation solaire) est impactée par la présence d'une PCV. En effet le

16. Zone climatique de type Dfb selon KÖPPEN, irradiation journalière maximum : 350 W.m⁻², gamme de température : 9 – 15°C.

17. PCV_H de 175 mm, mêmes conditions géographiques, toiture bitumineuse comme référence.

18. Bien que les courbes de température soient présentées afin de caractériser l'évolution thermique du système étudié.

19. Composition : 20 cm de substrat sur 11 cm de drainage en polyéthylène et végétalisé par du sédum (albedo de 0,23).

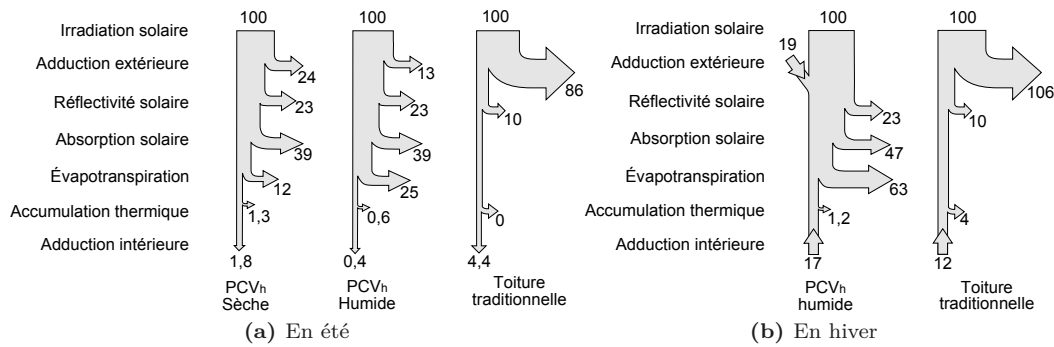


Figure 2.1 – Répartition des flux à travers une PCV_H en été et en hiver pour un climat méditerranéen de type Cfa selon Köppen [LAZZARIN et al., 2005].

flux d'adduction²⁰ de la toiture bitumineuse classique est alors réparti entre la réflectivité solaire, l'absorption solaire (dont la photosynthèse²¹) et l'évapotranspiration. Contrairement aux deux précédents, ce dernier évolue selon la teneur en eau dans le substrat. Enfin, en hiver, les intrants énergétiques étant plus faibles, l'évapotranspiration importante induit l'apparition d'un flux d'adduction extérieur positif, mais pas assez soutenu pour prévenir du flux d'adduction intérieur négatif. Dans ce cas, la PCV intensifie les pertes thermiques en hiver, corroborant ainsi l'observation²² de JIM pour un climat subtropical humide [JIM et TSANG, 2011a].

Certaines recherches ont classé l'évapotranspiration comme le phénomène dominant associé à la dissipation de l'énergie absorbée par la canopée [WONG et al., 2003b; THEODOSIOU, 2003; PALOMO DEL BARRIO, 1998; TAKAKURA et al., 2000; ONMURA et al., 2001; SAILOR, 2008]. Mais cette distinction ne fait pas consensus. En effet, d'autres études, plus anciennes, considèrent que le phénomène dominant est associé aux propriétés radiatives des feuilles [CURTIS, 1936; MELLOR et al., 1964]. À ce jour, le débat est toujours ouvert.

— Sensibilité de l'évapotranspiration —

Différentes mesures²³ dans des environnements agricoles [ANDERSON et al., 1984], urbain [TEJEDA-MARTINEZ, 1996] et suburbain [BARRADAS et al., 1999] ont obtenu des ratios similaires exprimant l'influence de l'évapotranspiration dans le transfert thermique associé à une PCV_H. Le tableau 2.2 résume les résultats de ces différentes études [ANDERSON et al., 1984; TEJEDA-MARTINEZ, 1996; BARRADAS et al., 1999]. Les trois types de transferts étudiés varient en fonction de la teneur en eau du substrat, toutefois tous sont importants dans les transferts thermiques au sein de la PCV_H.

Il apparaît que même dans pour un substrat sec, l'évapotranspiration joue un rôle important dans les transferts de chaleur (bien que nettement plus faible). Il s'avère également que les valeurs obtenues en laboratoire [GATES, 1980a] sont plus élevées que celles en conditions réelles pour l'étude des feuilles, mais pas pour celle de la PCV_H. Enfin, il est à noter que l'importance de l'évapotranspiration dans la réduction des transferts thermiques dans la paroi fait consensus [PALOMO DEL BARRIO, 1998; THEODOSIOU, 2003; KUMAR et KAUSHIK, 2005].

20. Adduction : ensemble des autres flux thermiques basés sur un échange de type sensible tel que la convection, l'irradiation GLO, mais aussi l'impact sur le flux thermique de l'activité métabolique de la plante, la respiration, la photosynthèse, et *ceaterra*.

21. Selon FENG, une expérimentation en climat subtropical humide basée sur du *Sedum lineare*. a permis de caractériser les flux sortants suivants : évapotranspiration (-58,4%), irradiation extérieure (-30,9%), photosynthèse (-9,5%), stockage du sol (-0,5%) et des plantes (-0,1%), adduction intérieure (-0,6%) [FENG et al., 2009]. Il apparaît donc que la notion de photosynthèse n'est pas toujours négligeable.

22. Observation précisée section 2.1.2.6.

23. Ces données ont été obtenues dans la ville de Mexico (Mexique) et sur des sites agricoles du Nebraska (USA).

24. Les PCV_H utilisées dans ces graphiques sont composées d'une isolation de 75 mm de fibre minérale, d'un

Table 2.2 – Sensibilité des flux relatifs à l'évapotranspiration, la conductivité du substrat et la convection dans différentes conditions [TABARES-VELASCO, 2009]

Zone2	Suburbain (Sub. sec)	Suburbain (Sub. humide)	Urbain	Agricole	Laboratoire (Feuilles)	Laboratoire (PCV _H)
ϕ_{Cv}/ϕ_{Tr}	0,68	0,27	0,36	0,21	0,14	0,23
ϕ_{Sub}/ϕ_{Tr}	0,07	0,03	0,04	0,05	N/A	0,09
ϕ_{Ev}/ϕ_{Tr}	0,25	0,70	0,60	0,72	0,86	0,68

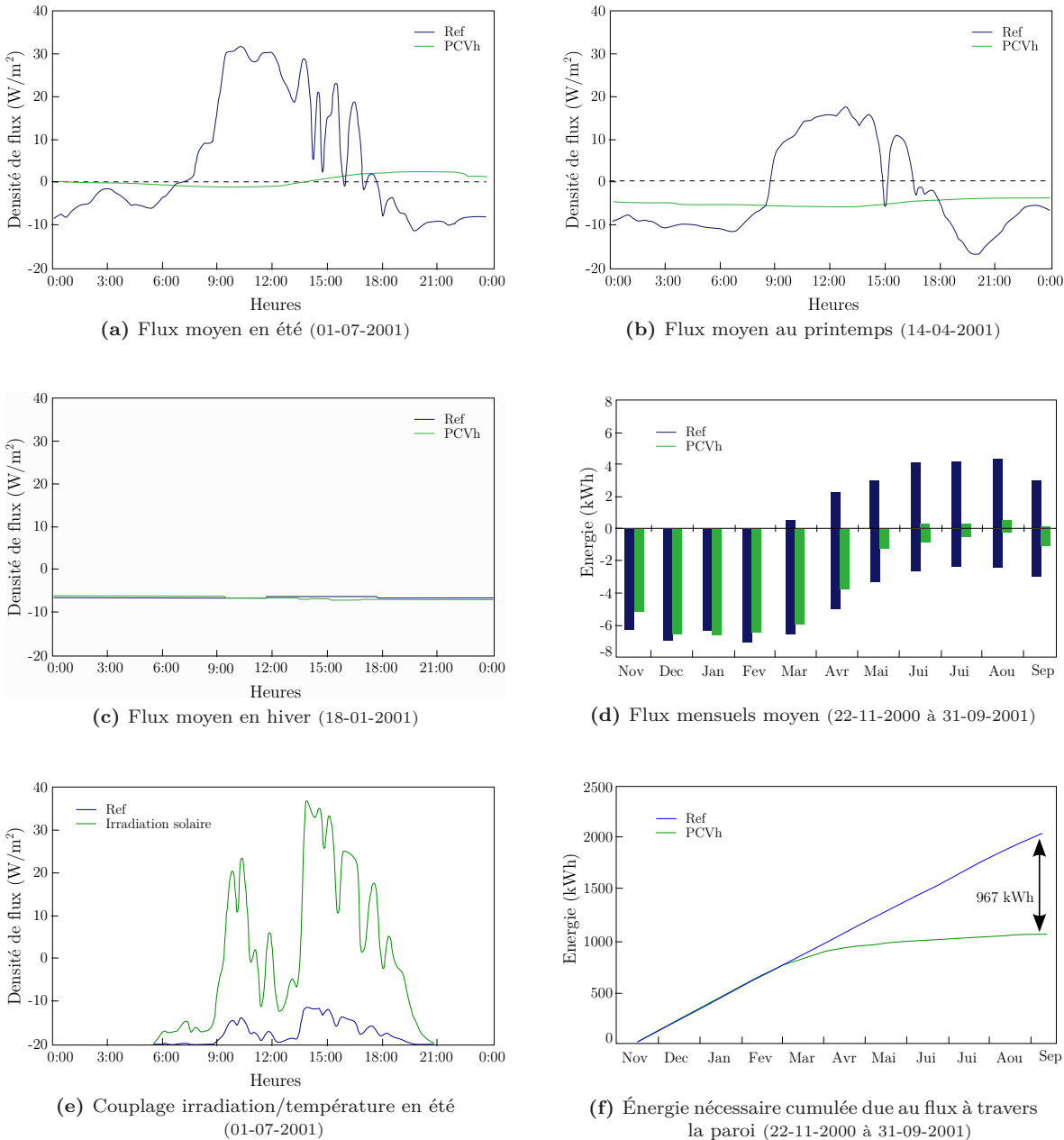


Figure 2.2 – Bilan des flux au cours du temps à travers une PCV_H²⁴ et une toiture bitumineuse de référence (Ref). [BASS, 1999]

drainage en polystyrène expansé de 35 mm et un substrat de 150 mm [BASS, 1999].

2.1.2.3 Impact sur le transfert thermique

— Réduction des gains —

La présence d'une PCV_H permet de réduire considérablement les gains thermiques. D'après CONNELLY [CONNELLY et LIU, 2005] une PCV_H de 75 mm permet une réduction des gains de 100% (gains nuls) aux mois d'automne à Ottawa²⁵. Une étude de douze mois effectuée par LIU [LIU et BASKARAN, 2004] sur une PCV_H de 175 mm (même site) confirme cette tendance : elle annonce une réduction annuelle de gains thermiques de 90% comparativement à une toiture bitumineuse classique.

La réduction des gains est permise par le découplage partiel des mesurandes *irradiation* et *flux* traversant la paroi [BASS, 1999] (Fig. 2.2e). En effet, la protection radiative et l'inertie thermique de la PCV permettent de réduire l'influence de l'irradiation sur la température de la paroi. L'inertie est principalement apportée par le substrat, alors que la protection radiative est principalement due à la végétation, dont la réflectivité comprise entre 0,70 et 0,85. En comparaison, la réflectivité associée à une toiture bitumineuse classique est de 0,1 à 0,2. La PCV_H permet donc de réduire considérablement les transferts radiatifs [GAFFIN et al., 2005].

Un autre phénomène est prépondérant dans la réduction des gains : l'évapotranspiration [LAZZARIN et al., 2005; TABARES-VELASCO, 2009]. Son impact est fonction de la teneur en eau de la PCV_H (Fig. 2.1, Tab. 2.2).

— Réduction des pertes —

Concernant les pertes, celles-ci sont réduites en moyennes de 56% en automne et 30% annuellement, d'après les deux études précédentes [LIU et BASKARAN, 2004; CONNELLY et LIU, 2005]. La cinétique des pertes est également modifiée, l'inertie de la PCV aidant, le flux thermique (négatif) est quasiment constant tout au long de la journée²⁶. À noter que cette caractéristique n'est pas présente pour les toitures bitumineuses classiques, dont la grande variabilité du flux est fortement couplée à l'irradiation. Toutefois, cette notion de variabilité est à pondérer en fonction de la couverture neigeuse possiblement présente.

— Réduction globale —

D'un point de vue global, à l'échelle de temps de la journée, un bilan de flux peut être effectué. Il comprend alors les gains survenant lors d'une irradiation suffisamment intense et les pertes dans le cas contraire. Les cas présentés précédemment définissent une réduction globale du transfert thermique en automne de 70% et 60% annuellement [LIU et BASKARAN, 2004; CONNELLY et LIU, 2005]. Ces résultats sont corroborés par ONMURA au Japon [ONMURA et al., 2001] qui annonce une diminution annuelle des transferts de 50%.

Les graphiques de la figure 2.2 expriment ces notions.

— Anisotropie directionnelle —

De nombreuses expériences prouvent que la présence d'une PCV_H permet de réduire considérablement les flux thermiques traversant une paroi. Ces mêmes expériences différencient souvent l'impact spécifique de la PCV selon le sens de ces flux. La répercussion étant différente selon qu'ils soient entrants (gains) ou sortants (pertes). Il apparaît donc une certaine « anisotropie directionnelle » de la PCV.

Cette anisotropie, provient notamment des phénomènes d'évaporation et de transpiration. Elle induit une capacité plus importante de la PCV à limiter les gains que les pertes²⁷ (d'autant plus que le substrat est humide).

25. Ottawa, capitale du Canada, située dans la province de l'ONTARIO. Zone de KÖPPEN : Dfb.

26. Cette constance rendant la gestion énergétique du bâtis bien plus aisée.

27. Cette propriété explique en partie l'origine de la saisonnalité des parois complexes végétalisées.

2.1.2.4 Influence de l'épaisseur

— Résistance thermique de la PCV et linéarité —

À teneur en eau égale, une épaisseur de substrat plus importante induit une résistance thermique du substrat également plus importante²⁸ [KUTILEX et al., 1988; WOLFSON et PASACHOFF, 1995]. Toutefois, l'évolution de la résistance thermique du substrat n'est pas nécessairement apparente. En effet, dans certaines conditions, le transfert thermique dû à la vapeur d'eau dans le substrat est trop important pour que l'évolution de la résistance soit visible²⁹.

De ce fait, la corrélation entre l'épaisseur du substrat et la résistance thermique apparente associée n'est pas nécessairement linéaire (puisque subordonnée au climat). Cette notion est aisément identifiable lors du gel du substrat. Le substrat gelé ayant une plus forte conductivité thermique, toute augmentation de l'épaisseur³⁰ conduisant au passage du front de solidification (donc à un substrat ayant sa couche inférieure non gelée) conduit à une évolution non linéaire de la résistance thermique³¹.

Pour des faibles épaisseurs de substrat, la résistance thermique apparente de PCV_H de type extensif évolue sur $[1, 17 - 2, 70] \text{ W.m}^{-2}.K^{-1}$ [WONG et al., 2003a; TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2009a; BELL et SPOLEK, 2009]. Pour une plus forte épaisseur (400 mm) celle-ci diminue à $0,454 \text{ W.m}^{-2}.K^{-1}$ [WONG et al., 2003a]. Ce résultat contre-intuitif (diminution) peut être expliqué par la différence de conditions météorologiques, impactant notamment l'évapotranspiration, qui à elle seule peut réduire la température de surface de 4°C [BASS, 1999]. D'une manière générale, selon BASS [1999] la résistance thermique d'une paroi peut être augmentée jusqu'à 30%; toutefois, la présence d'une PCV_H peut également augmenter les pertes³² si l'on se réfère aux flux négatifs observés en journée par [LAZZARIN et al., 2005; JIM et TSANG, 2011a] et [JEAN et al., 2014].

— Résistance thermique apparente et teneur en eau —

L'épaisseur du substrat n'est donc pas le facteur principal définissant la résistance thermique apparente, son évolution étant subordonnée à la teneur en eau de la PCV_H. Différentes études indiquent que le substrat humide permet une meilleure réduction du flux thermique à travers la paroi que le substrat sec [WOLFSON et PASACHOFF, 1995]. CONNELLY [CONNELLY et LIU, 2005], en donne un exemple se déroulant durant les mois d'automne. Dans celui-ci, les réductions des pertes de flux associées à des PCV humides de 75 mm et 150 mm d'épaisseur sont sensiblement égales³³. Ce résultat caractéristique provient principalement de la combinaison de trois phénomènes :

1. L'ajout d'eau dans le substrat augmente la conductivité thermique. S'il est saturé en eau, cette propriété tend à rendre les différences d'épaisseurs peu significatives.
2. Si il y a évaporation dans le substrat, alors la vapeur d'eau produite augmente la conductivité thermique de ce dernier.
3. Dans le cas d'un changement de phase, il y a également diminution de la température locale, impactant³⁴ ainsi le gradient de température dans le substrat.

La pondération de chacun de ces phénomènes (ou sensibilité) dépend du degré de saturation en eau du substrat ainsi que de l'importance du débit d'eau évaporé.

Par conséquent, le flux thermique dans la PCV est fonction du champ thermique en présence, de la

28. L'intensité de l'influence de l'épaisseur du substrat sur le flux thermique ne fait pas consensus. Des études l'estiment bas [KUTILEX et al., 1988], d'autres haut [WOLFSON et PASACHOFF, 1995].

29. La différence de conditions expérimentales est susceptible d'expliquer pourquoi l'influence de l'épaisseur du substrat sur le flux thermique ne fait pas consensus.

30. Pour information, malgré le gel partiel du substrat, une PCV_H de 225 mm permet de garder la couverture bitumineuse hors gel par -22°C (pour la région de Toronto) [LIU et BASKARAN, 2004].

31. Due à l'apparition d'un second matériau ayant une conductivité thermique différente.

32. À noter que dans ce cas la notion de résistance équivalente n'est plus représentative du système observé.

33. La variation du simple au double de l'épaisseur du substrat induit des réductions de perte de flux de 56% à 55% [CONNELLY et LIU, 2005].

34. La diminution de température locale augmentant ou réduisant le gradient de température en fonction du champ de température présent à cet instant.

teneur en eau dans le substrat et des conditions météorologiques (régulant l'évaporation). À noter qu'une épaisseur de substrat plus importante permet d'augmenter la capacité de stockage en eau. L'épaisseur du substrat joue donc un rôle prépondérant, notamment en cas de précipitations peu fréquentes.

— *L'inertie* —

LIU [LIU et BASKARAN, 2004] corrobore les observations de CONNELLY toutes saisons confondues concernant la réduction des pertes de flux. Seule une très légère fluctuation du flux au cours de la journée est perceptible³⁵ entre des PCV_H de 225 mm et 175 mm. Cette fluctuation est due à une différence d'inertie provenant principalement de l'humidité contenue dans le substrat. Cette dernière ayant la capacité de stocker une quantité importante d'énergie sous forme de chaleur sensible.

— *Bilan* —

Considérant les phénomènes physiques présents, il apparaît que l'influence de l'épaisseur du substrat sur le flux thermique est principalement due à l'eau qu'il contient [LIU et BASKARAN, 2004]. L'impact thermique intrinsèque à sa composition étant secondaire face aux transferts massiques et thermiques associés à l'eau.

2.1.2.5 Influence dynamique : saisonnalité

— *Impact de la saisonnalité* —

L'évolution temporelle du transfert thermique à travers la PCV_H a été relevée expérimentalement par LIU³⁶ (Fig. 2.2d). Elle observe notamment une diminution des gains de 75% en été. En automne et début d'hiver, cette efficacité semble être nettement diminuée, la PCV_H devenant thermiquement comparable à la toiture de référence [LIU et BASKARAN, 2004; LAZZARIN et al., 2005]. Enfin, en climat froid, durant l'hiver l'évolution est principalement subordonnée à deux phénomènes antagonistes : le gel du substrat et sa couverture neigeuse. Le premier diminuant la résistivité thermique du substrat, alors que la seconde l'augmente [PECK et CALLAGHAN, 1999; LIU, 2003]. Comparativement à une toiture bitumineuse dallée sur lit de sable, LIU [LIU et BASKARAN, 2004] annonce une réduction des pertes en hiver de 30% à TORONTO.

— *Saisonnalité de la résistance thermique* —

La PCV_H a la propriété intrinsèque d'évacuer la chaleur principalement par évaporation de l'eau contenue dans le substrat et par transpiration des plantes. De ce fait, tant que le substrat est humide, la PCV agit comme une pompe à chaleur dont la source chaude est le bâti et la source froide l'environnement extérieur. Par voie de conséquence, la résistance thermique de la PCV_H évolue en fonction des sollicitations, ainsi que des cycles circadiens et saisonniers (Fig. 2.2d et 2.1) [LIU et BASKARAN, 2004; LIU et MINOR, 2005]. La protection globale procurée par la PCV étant évolutive elle peut alors être définie par une résistance thermique apparente évolutive : $R_{ap}(t)$.

— *Isolation traditionnelle* —

L'évacuation des calories par évaporation évoluant en fonction de l'humidité du substrat, la PCV_H peut nécessiter l'ajout d'une isolation traditionnelle dans les climats humides ayant une saison froide ou tempérée. À noter que l'impact de cette isolation sur la résistance thermique a une influence relative due à la saisonnalité observée. En effet, expérimentalement, l'impact de la

35. Toutefois, des différences apparaissent en hiver dues au gel du substrat, voir figure 2.2d [LIU et BASKARAN, 2004].

36. Expérimentation faite sur une PCV de 225 mm, comparativement à une toiture bitumineuse classique et sous un climat continental humide [LIU et BASKARAN, 2003, 2004]

présence d'un panneau drainant en polystyrène expansé sur la résistance thermique d'une PCV_H est bien meilleur en hiver qu'en été³⁷ [LIU et BASKARAN, 2004; LIU et MINOR, 2005].

— *L'inertie thermique* —

De plus, la saisonnalité impacte également l'inertie thermique du système étudié. Par exemple, si deux PCV_H (identiques par ailleurs) ont une différence d'épaisseur, la différence d'inertie thermique engendrée est à son paroxysme en été, mais diminue drastiquement en hiver sous un climat humide [LIU et BASKARAN, 2004].

— *L'impact des plantes* —

La végétation fait partie intégrante des êtres vivants. À ce titre, elle évolue dans le temps, que cette évolution résulte de phénomènes intrinsèques à celle-ci (croissance, cycles circadiens, saisonniers, *etc.*) ou bien extrinsèques (impacts de parasites, prédateurs ou autres sollicitations inadaptées, *etc.*). Ainsi, il arrive qu'une partie de la PCV_H soit localement exempte de végétation. Cette absence impacte dès lors le transfert thermique.

Toujours selon LIU, en l'absence des plantes, le substrat seul arrive aux mêmes réductions de pertes. Concernant la réduction des gains, elle diminue de 90% à 50%, comparativement à une toiture bitumineuse classique non protégée. En 2002, une étude menée à l'université de Pennsylvanie [TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2011] corrobore cette tendance. Elle indique que l'évapotranspiration pourrait être le phénomène prépondérant dans la réduction des flux thermiques estivaux. Il apparaît ainsi que l'ensemble *substrat + végétation* constitue l'outil majeur de la réduction des gains thermiques.

2.1.2.6 Influence du climat

Les conditions climatiques conditionnent la capacité des plantes à transpirer, elles peuvent amener le substrat à geler, se déshydrater, être saturé en eau ou couvert de neige (*etc.*). Elles influent donc grandement sur les caractéristiques thermiques de la PCV_H.

— *Épisodes climatiques* —

Concernant la neige, des études effectuées au Canada [BASS, 1999; PECK et CALLAGHAN, 1999; LIU, 2003] indiquent que sa présence diminue la fluctuation de la température au sein de la paroi. En quantité homogène et suffisante [BASS, 1999], elle est également définie comme une « excellente isolation » par LIU [LIU, 2003]. Toutefois, ceci est vrai uniquement si le point de condensation est dans le substrat et non dans le bâti [PECK et CALLAGHAN, 1999].

Lorsque le substrat gèle, le changement d'état induit une meilleure conductivité thermique. De ce fait, les capacités d'isolation thermique du substrat, et donc de la PCV_H chutent considérablement [LIU, 2003; LIU et BASKARAN, 2004].

À noter que les conséquences thermiques en cas de forts épisodes de vent ou de pluie (cyclones, tornades, moussons, *etc.*) n'ont pas été étudiées.

— *Impact du climat* —

En climat continental, considérant la capacité des PCV_H à limiter les pertes³⁸, il semble que leur efficacité soit plus importante dans les régions chaudes [LIU et BASKARAN, 2003]. Les résultats obtenus pour des PCV_H identiques soumises à des climats légèrement différents³⁹ tendent à corroborer cette hypothèse [LIU et BASKARAN, 2004].

En climat méditerranéen il n'y a pas de couverture neigeuse afin de protéger la paroi. De ce fait, la faible irradiation couplée à l'évapotranspiration (principalement) induit un bilan énergétique

37. La réduction des pertes dues à la présence d'un panneau drainant en polystyrène expansé est de 10% en hiver et quasi nulle en été [LIU et BASKARAN, 2004; LIU et MINOR, 2005].

38. Faible capacité d'isolation pour des substrats d'épaisseur inférieure à 30 cm.

39. Expérimentations effectuées au Canada, à Ottawa (Dfb) et Toronto (Dfb).

négatif [LAZZARIN et al., 2005]. Ce comportement a été également vérifié à Hong-Kong, donc dans un climat subtropical humide [JIM et TSANG, 2011a].

Contrairement aux résultats trouvés pour les climats continentaux, sous un climat subtropical humide la dynamique du comportement de la PCV_H peut, selon la saison, ne pas correspondre à celui d'un matériau classique, défini par sa résistance thermique. En effet, dans ce cas l'impact du complexe sur le champ thermique du bâti se rapproche de celui d'une pompe à chaleur, ce transfert pouvant conduire à une surconsommation de chauffage afin de compenser les pertes. L'évolution de la résistance thermique apparente « $R_{ap}(t)$ » est donc fonction du type de climat.

2.1.2.7 Impact sur la demande en énergie

— Saisonnalité —

Considérant le lien de subordination direct entre le flux thermique traversant la PCV_H et la consommation énergétique, il est naturel que ce dernier évolue également de manière dynamique. D'après LIU [LIU et BASKARAN, 2004], la réduction moyenne de la demande en énergie⁴⁰, due à une PCV de 225 mm est présente tout au long de l'année dans des proportions différentes. Elle est de 50 à 90% l'été et de 10 à 40% l'hiver. Annuellement, cette réduction est de l'ordre de 50%, répartie en moyenne sur une diminution des gains (90%) et des pertes (30%), correspondant respectivement aux besoins en climatisation et en chauffage.

— Épaisseur (et saisonnalité) —

Selon la saison, l'épaisseur du substrat n'impacte pas de façon identique les flux traversant la PCV_H. Ce paramètre influe donc sur la demande en énergie (Fig. 2.2d). Pour un climat continental humide [LIU et BASKARAN, 2004], en été, la différence de demande en énergie due à des PCV_H de 175 et 225 mm est faible (inférieure à 5%). Durant l'hiver, ces deux substrats sont gelés, dont le premier totalement. De ce fait, l'impact sur leurs résistivités thermiques induit une demande en énergie plus importante (10%). Sur l'année, la différence entre ces deux épaisseurs est de l'ordre de 8%. Le taux de variation associé à l'épaisseur étant de 22%, l'impact de ce paramètre n'est donc pas linéaire.

À noter que les besoins en énergie traduisent des utilisations différentes selon la saison, climatisation en été et chauffage en hiver. Une PCV correctement dimensionnée est donc apte à réduire considérablement les besoins en énergie.

— Localisation de l'impact —

La présence d'une PCV se traduit par un impact principalement localisé dans les zones adjacentes à l'installation. D'après SAIZ [SAIZ et al., 2006], les besoins en climatisation pour une maison classique de Toronto sont globalement diminués de 25%, alors qu'ils sont de 60% pour la zone sous-jacente à la PCV_H. Cette distribution est plus évidente à l'échelle d'un immeuble de 8 étages. Toujours d'après SAIZ [SAIZ et al., 2006], une PCV_H installée sur le toit (à Madrid) permet de réduire, à l'échelle de l'immeuble, les besoins en climatisation de 6% durant l'été. Durant les pics de consommations, cette réduction est globalement de 10% répartie sur les quatre étages supérieurs dont leurs besoins ont respectivement diminués de 25%, 9%, 2% et 1%.

— Mesure de l'impact —

Les propriétés thermiques des PCV_H et leurs impacts sur les flux de chaleurs traversant la paroi sont fonction des conditions météorologiques. De ce fait, il n'est pas aisé de les caractériser. Afin de pallier le caractère dynamique, une solution consiste à observer l'impact énergétique, tel que présenté dans les paragraphes précédents. Toutefois, il est à noter que l'impact exprimé en pourcentage est fortement corrélé à l'isolation de l'enceinte considérée. De ce fait, ce témoin est donc à interpréter avec précaution.

40. Comparativement à une toiture bitumineuse dallée sur lit de sable.

Dans le but de pouvoir comparer les PCV_H d'un point de vue énergétique, MOODY propose en 2013 un coefficient, le DBGR, exprimé par l'équation 2.1 [MOODY et SAILOR, 2013] :

$$DBGR = \frac{E_{eq}}{E_{pcv}} \quad (2.1)$$

Le DBGR (*Dynamic Benefit of Green Roofs*) est basé sur le principe de la mesure de l'efficacité thermique des enveloppes inertiques (DBMS) proposé en 2001 par le laboratoire « Oak Ridge National Laboratory » (ORNL). Dans cette formulation, E_{pcv} représente l'énergie CVC⁴¹ annuelle associée à la PCV_H. Quant à E_{eq} , il représente l'énergie CVC annuelle associée à une paroi traditionnelle équivalente⁴². Ainsi, une valeur du DBGR supérieur à l'unité indique une performance supérieure de la PCV_H comparée à sa paroi classique équivalente⁴³.

2.1.2.8 Synthèse des résultats expérimentaux

Les diverses études expérimentales ont permis de caractériser l'impact des PCV_H selon trois aspects :

1. Le flux thermique ;
2. Le champ de température ;
3. La consommation énergétique associée.

Une synthèse est proposée par le tableau 2.5.

À noter que ces trois aspects caractérisent le comportement de la PCV_H. Ce comportement provient essentiellement de la composition de la PCV_H, mais également (fortement) des influences climatiques qu'elle subit. En ce sens, certaines des études expérimentales ont tenté de caractériser l'influence de trois facteurs : l'épaisseur du substrat, la saisonnalité et le climat.

La compréhension fine des processus associés à ces facteurs n'est pas évidente, car ils font intervenir de nombreux phénomènes impactant les transferts thermiques au sein de la PCV_H. Selon les études de sensibilités effectuées, les phénomènes prédominants sont les suivants : la réflectivité solaire, l'absorption solaire, le flux d'adduction externe et l'évapotranspiration (flux évoluant selon la teneur en eau dans le substrat).

Comparativement à une toiture bitumineuse classique, la PCV_H permet de diminuer les gains et les pertes annuels en climat continental. Toutefois, en climat méditerranéen ou subtropical humide seuls les gains sont diminués, les pertes ayant tendance à être amplifiées. Cette différence de comportement est due au climat, celui-ci gouvernant les deux phénomènes prépondérants : l'irradiation et l'évapotranspiration.

Suite à ces constats, et dans le but de pouvoir prédire de façon dynamique l'évolution du transfert thermique dans une PCV, les phénomènes observés et leurs interactions ont été modélisés à différentes échelles et selon diverses approches. Cette notion est l'objet de la sous-section suivante.

41. Énergie affectée au chauffage, à la ventilation et à la climatisation.

42. *Id est* : paroi définie par des caractéristiques physiques constantes et ayant une résistance thermique égale à celle de la PCV_H mesurée en régime permanent (R_{PCV}).

43. Afin de permettre une comparaison inter-PCV_H il est donc nécessaire que le calcul de la résistance équivalente soit fait dans des conditions normalisées.

Table 2.3 – Caractérisation expérimentale de l'impact des PCV.

Étude	Lieu	Période	Composition	Indicateurs ⁴⁴	Commentaires
Liu et BASKARAN [2004]	Ottawa, Canada	Annuel	gazon <i>Kentucky blue</i> , substrat : 225 mm	Réduction des gains : 95%, pertes : 26%, global : 47%	Le gel du substrat augmente la conductivité alors que la couverture neigeuse isole. Référence : toiture bitumineuse.
Connelly et LIU [2005]	Vancouver, Canada	Automne	<i>Sedum Sedangulare</i> , <i>Festuca Scoparia</i> , <i>Hart Fescue</i> (...), substrat : 75 mm	Réduction des gains : 100%, pertes : 56%, global : 70%	Population de <i>Festuca Scoparia</i> initialement détruite par des corbeaux. Référence : toiture bitumineuse.
Teemusk et MANDER [2010]	Tartu, Estonie	Annuel	<i>Sedum acre</i> , substrat : 100 mm, laine de roche (rétention d'eau) : 80 mm, drainage en plastique	Rapport des températures de structure PCV/Référence évolue entre 0,98 et 1,20.	Taux de couverture de 45%. Référence : toiture bitumineuse.
Onmura et al. [2001]	Osaka, Japon	Été	Gazon 30 mm, substrat drainant : 80 mm	Réduction du flux global : 50%, $\Delta T^{max} = 30^{\circ}\text{C}$	Irrigation dans substrat. Référence : toiture dalle béton.
Lazzarin et al. [2005]	Vicenza, Italie	Annuel	<i>Sedum</i> , substrat 200 mm, drainage en polyéthylène : 110 mm	Réduction du flux global été : 60%, hiver : -42%	Référence : non indiqué.
Sfakianaki et al. [2009]	Athènes, Grèce	Mars à mai	<i>Sedum</i> , buissons et arbustes, substrat, rétention hydrique, drainage (épaisseurs non indiquées)	Réduit de 2 à 5% les besoins en chauffage et de 11% les besoins en climatisation. $\Delta T^{max} = 9^{\circ}\text{C}$, diminution de la température d'air interne : 0, 6°C	Taux de couverture : 75%. Isolation de 5 cm ($\lambda = 0,03 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) est présent sous la structure béton. Référence : non indiquée.
Hien et al. [2007]	Singapour, Singapour	Annuel	Plantes : multiples (type CAM), substrat 100 mm	Réduction maximale du flux global : 60%, $\Delta T^{max} = 18^{\circ}\text{C}$	Comparaison du même site avant/après installation de la PCV (juin/février). Référence : toiture dalle béton.
Wong et al. [2003b]	Singapour, Singapour	Novembre	Plantes : <i>Ophiopogon</i> , <i>Erythrina</i> , <i>Raphis palm</i> , substrat : 400 mm	Réduction des gains : 100%, pertes : -2476%, $\Delta T^{max} = 30^{\circ}\text{C}$	LA PCV induit de fortes pertes. Référence : toiture dalle béton.
Jim et TSANG [2011a]	Hong-Kong, Chine	Annuel	Arbres (3,5 à 6 m), substrat 1000 mm, laine de roche (rétention d'eau) : 80 mm, drainage	Flux global sous la PCV durant l'été/hiver : $-29 / 16 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, ΔT^{max} été/hiver : 32 / 20°C	Forêt sur le toit d'un immeuble. Réduction du flux thermique à partir de 10 cm. Référence : toiture dalle béton.

⁴⁴ Les pourcentages négatifs correspondent à des flux thermiques perdus par la PCV vers l'environnement extérieur (proportionnellement au flux entrant dans la toiture de référence).

2.2 Approche théorique

Modéliser et prédire l'impact thermique d'une PCV_H n'est pas chose aisée, car divers phénomènes complexes sont à l'œuvre. En effet, cet impact est gouverné par les transferts thermiques et massiques présents à travers la paroi. Or, ceux-ci résultent entre autres de l'ombre portée sur la surface du substrat par les plantes, de l'irradiation solaire, de l'évapotranspiration, de l'inertie thermique [LIU, 2004-11-04], mais aussi de l'état des plantes (développement, saisonnalité), de la teneur en eau du substrat, *etc.*

Afin de pallier ces difficultés, divers types de modèles furent créés. Il semblerait que le premier modèle théorique publié, prédisant l'impact thermique d'une PCV_H, soit celui d'une équipe Indienne en 1982 [NAYAK et al., 1982]. Depuis, les modèles proposés se sont peu à peu affinés, passant par l'utilisation de résistances en régime permanent et/ou par l'ajustement des propriétés radiatives/spectrales de la paroi en fonction du type de végétation. Puis, plus récemment, deux approches radicalement différentes sont apparues, l'une physique, la seconde stochastique⁴⁵. Dans une approche physique, des modèles ont intégré des bilans thermiques et massiques afin de considérer les phénomènes observés, tels que l'évapotranspiration. Ce faisant, ces modèles sont devenus plus précis, mais aussi plus complexes.

L'objet de cette section consiste à expliciter la logique sous-jacente aux principaux modèles observés dans la littérature.

2.2.1 Les types de modélisation

2.2.1.1 Pluralité des domaines

La modélisation d'un phénomène consiste à représenter celui-ci par un jeu d'équations, ou par des modèles mathématiques permettant de reproduire et donc prédire l'évolution du système étudié. Dans le cas des PCV, ce jeu d'équation recoupe plusieurs domaines scientifiques. Si l'on considère uniquement l'approche thermique, les domaines prépondérants à l'obtention de résultats précis sont les suivants :

Les transferts thermiques :

Évolution dans les milieux continus, poreux, fluides et végétaux ;

Les transferts massiques :

Évolution dans les milieux poreux, fluides et végétaux ;

La botanique :

Évolutions saisonnière et circadienne, adaptation aux sollicitations en fonction des besoins vitaux (notion de « matériau » vivant) ;

La complexité de l'étude des PCV est caractérisée, entre autres, par cette pluridisciplinarité. Elle induit généralement⁴⁶ l'utilisation d'un modèle combinant différents sous-modèles⁴⁷ inhérents aux divers phénomènes physiques observés.

45. La modélisation stochastique pure d'une PCV_H est principalement basée sur les réseaux de neurones. Difficilement généralisable, cette approche fait l'objet de peu d'études. Elle n'est pas étudiée dans ce chapitre.

46. Il est possible de modéliser une PCV par un modèle unique (empirique ou stochastique), mais cette approche induit une forte erreur sur le résultat.

47. Un modèle est catalogué comme « sous-modèle » à partir du moment où celui-ci est combiné avec d'autres modèles dans un ensemble plus vaste.

2.2.1.2 Les sous-modèles

Au sein du modèle, les sous-modèles peuvent être de cinq types⁴⁸ : empiriques, déterministes, déterministes simplifiés, simplifiés et stochastiques. Les nuances entre ces diverses approches sont définies ci-dessous. À noter que chacune de ces approches, ou type de modèle, ont des avantages et des inconvénients concernant les temps de calcul, la précision des résultats, les données nécessaires ou la complexité de mise en œuvre. Par conséquent, le choix des sous-modèles les plus adaptés, et donc du modèle optimal, pour un cas donné est alors déterminé en fonction des besoins.

— Empiriques —

Les modèles empiriques, où méta-modèles, sont obtenus à partir de l'interpolation de résultats expérimentaux. Les équations obtenues proviennent du traitement numérique des variables observées. De ce fait, au sein des équations formant le modèle empirique, ces variables se trouvent pondérées par des scalaires introduits sous forme de facteurs ou d'exposants.

À noter que ces équations sont propres au système étudié et difficilement exploitable pour d'autres systèmes ; c'est la raison pour laquelle ce type de modèle est peu utilisé en recherche pour définir une PCV_H. Ils ont par ailleurs l'avantage d'être aisément implémentables et nécessitent un faible temps de calcul.

— Déterministes —

Les modèles déterministes, ou modèles détaillés, sont caractérisés par une description très précise, très fine des phénomènes physiques (tels que des bilans d'énergie ou de matière). Tous les coefficients et symboles présents ont une signification physique profonde. En ce sens, ils sont conceptuellement à l'opposé des modèles empiriques ou stochastiques, car ils décrivent finement le système. Pour cette raison ils sont quelques fois identifiés sous la notion de « boîte blanche ». Les modèles déterministes décrivant les PCV_H sont les modèles les plus robustes. Ils permettent d'obtenir des résultats précis, mais nécessitent une importante puissance de calcul ainsi qu'une compréhension (et donc une modélisation) fine des phénomènes physiques en présence. Ces deux considérations (surtout la seconde) font que très peu⁴⁹ de modèles de PCV_H utilisent cette approche.

— Déterministes simplifiés —

Les modèles déterministes simplifiés, où modèles semi-détaillés correspondent à une simplification de l'approche déterministe. Ceci, car les phénomènes physiques implémentés sont décrits à une plus grande échelle, ne tenant donc pas compte des petites variations. Ceci induit une légère perte de précision des résultats, mais également une plus grande facilité de mise en œuvre et un temps de calcul nettement plus faible.

Considérant la précision des résultats, le temps de calcul et la généralisation possible des modèles créés, cette approche représente souvent le meilleur compromis. De ce fait, la grande majorité des modèles proposés par les études inhérentes aux PCV_H sont actuellement de type déterministe simplifié.

— Simplifiés —

Les modèles simplifiés sont des modèles basés sur des moyennes ; ils sont donc plus « grossiers » que les modèles semi-détaillés. Leur temps de calcul est faible et leur mise en œuvre aisée, mais leurs résultats sont entachés d'erreurs dues aux hypothèses simplificatrices effectuées. Considérant la précision des résultats, cette approche est généralement peu utilisée dans les

48. La dissociation entre les types de sous-modèle n'est pas toujours chose aisée. En effet, il arrive que le modèle obtenu provienne d'une approche mixte. C'est le cas par exemple d'un modèle semi-détaillé pondéré par un scalaire (sans signification physique apparente) suite à une procédure d'optimisation.

49. À notre connaissance il n'existe aucun modèle de PCV_H totalement déterministe.

études portant sur les PCV_H lorsqu'une autre méthode est accessible.

— Stochastiques —

Les modèles stochastiques se basent sur des processus statistiques. Afin de prédire l'évolution thermique des PCV_H, les modèles stochastiques utilisés sont principalement basés sur le principe d'apprentissage. Il s'agit de faire apprendre au modèle les réponses thermiques de la PCV_H en fonction des sollicitations (données météorologiques). Pour cela, les réseaux de neurones artificiels (RNA) peuvent être utilisés. Le principe sous-jacent à la configuration d'un réseau de neurones (séquence d'apprentissage) pour une PCV_H type est le suivant : ayant appris les réactions de la PCV_H en fonction des sollicitations, le modèle est alors capable de prédire l'évolution thermique de la PCV_H. Donc, par extension, le modèle est également capable de prédire l'évolution thermique d'une PCV_H (idéalement) identique, soumise à des sollicitations similaires.

2.2.1.3 Caractérisation du modèle

Il est possible d'obtenir un modèle composé de sous-modèles basés sur des approches conceptuelles totalement différentes. Ce dernier étant défini par les sous-modèles le composant, il peut être caractérisé comme un système de type « boîte blanche », « boîte noire » ou « boîte grise ». Les notions de boîte blanche, noire ou grise, définies dans la théorie des systèmes, sont présentées ci-dessous.

— Boîte blanche —

La notion de boîte blanche (ou boîte transparente) caractérise un système dont, pour des entrées données, les sorties sont prédites, car le fonctionnement interne du système est connu. La figure 2.3 en est l'illustration. La boîte blanche définit donc un modèle dit « de connaissance », les modèles détaillés, semi-détaillés, simplifiés et empiriques sont des modèles de connaissance ; leurs nuances résident dans leurs précisions et applicabilités.

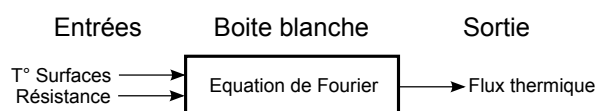


Figure 2.3 – Boîte blanche : Exemple d'obtention du flux thermique par l'utilisation de l'équation de FOURIER dans un milieu solide homogène isotrope.

— Boîte noire —

La notion de boîte noire caractérise un système dont, pour des entrées données, les sorties sont prédites par des équations paramétrées sans sens physique. Les relations entre entrées et sorties étant inconnues, les équations sont obtenues par « apprentissage » des données. Les modèles de type stochastiques sont qualifiés de boîtes noires. La figure 2.4 en est l'illustration.

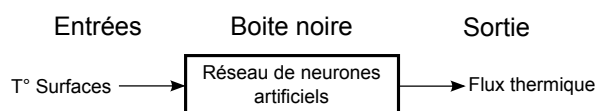


Figure 2.4 – Boîte noire : Exemple d'obtention du flux thermique par l'utilisation d'un RNA dans un milieu solide homogène isotrope dont la résistance thermique évolue en fonction de la température.

— Boîte grise —

La notion de boîte grise caractérise un système composé de boîtes blanches et de boîtes noires.

En ce sens, une boîte grise est également nommée modèle « mixte », « hybride » ou « semi-physique ». La figure 2.5 en est l'illustration. Un modèle composé de sous-modèles détaillés et stochastiques est typiquement qualifié de boîte grise.

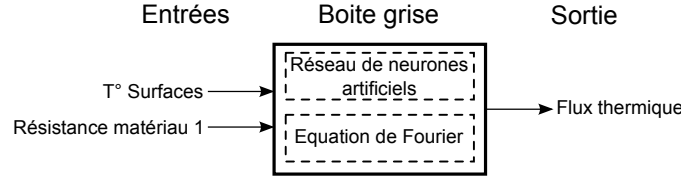


Figure 2.5 – Boîte grise : Exemple d'obtention du flux thermique dans une paroi composée de deux milieux solides homogènes isotropes dont les résistances thermiques sont respectivement fixes (utilisation de l'équation de FOURIER) et évoluant en fonction de la température (utilisation d'un RNA).

2.2.2 Description des transferts inhérents aux PCV_H

Les PCV_H sont le siège de deux types de transferts : les transferts massiques et énergétiques. Présentés ici séparément, ces deux types de transferts sont en réalité couplés⁵⁰. Afin d'expliciter les subtilités de leurs interactions, l'impact de la végétation et le couplage général sont également abordés.

2.2.2.1 Transferts énergétiques

Les transferts énergétiques associés aux PCV peuvent être mis sous la forme d'un bilan de flux global (Eq. 2.2). La convention prise est celle dite du « banquier », tout flux sortant du bâti sur laquelle est positionné la PCV est considéré comme négatif, alors que les flux entrants sont considérés positifs.

$$\phi_{PCV} = \phi_{Ir} + \phi_{Cv} + \phi_{Rd} + \phi_{Ev} + \phi_{St} + \phi_{SM} + \phi_P + \phi_{Ex} \quad (2.2)$$

L'approche systémique présentée par la figure 2.6 permet de représenter ce bilan. Elle définit deux types d'intrants⁵¹ : la production énergétique interne (ϕ_P) et les sollicitations (ϕ_{Ir} , ϕ_{Rd} et ϕ_{Cv}). Les pertes sont au nombre de deux : l'évapotranspiration (ϕ_{Ev}) et l'énergie présente dans l'eau à l'exutoire (ϕ_{Ex}). Il existe également deux types de stockage : par le complexe abiotique⁵² (ϕ_{St}) et par le métabolisme de la plante (ϕ_{SM}). Enfin, le flux restant représente le flux entrant dans le bâti associé à la PCV_H (ϕ_{PCV}).

Considérant cette représentation, il apparaît que le flux entrant dans le bâti associé à la PCV (ϕ_{PCV}) peut être positif ou négatif en fonction des sollicitations et de l'énergie stockée. Compte tenu de la convention établie, les pertes thermiques sont alors définies par une valeur de ϕ_{PCV} négative et inversement. La PCV a donc la capacité de fonctionner soit comme une résistance thermique ($\phi_{PCV} > 0$), soit comme une pompe à chaleur ($\phi_{PCV} < 0$).

50. En effet, les pertes par évapotranspiration (par exemple), sont présentes au sein des algorithmes de transfert thermique et massique. Chacun de ces algorithmes doit donc être implémenté afin d'être exécuté simultanément (*i.e.* au même pas de temps).

51. En fonction des conditions, et selon la convention établie, les intrants peuvent être de signe négatif.

52. Typiquement le substrat et la structure porteuse.

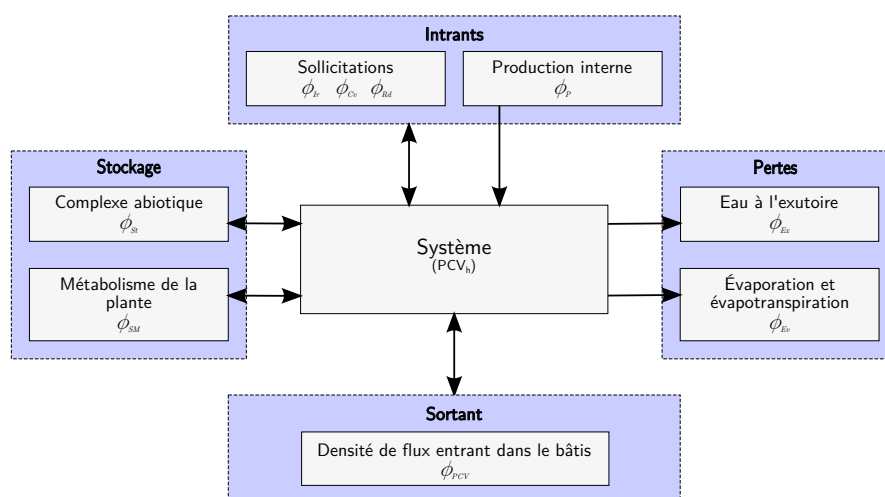


Figure 2.6 – Modèle général de transfert énergétique associé aux PCV_H.

2.2.2.2 Transferts massiques

Dans le cas d'une PCV_H dont la quantité de substrat reste constante, le bilan de masse se résume alors à un bilan hydrique. En ce sens, les transferts associés aux PCV_H sont similaires à ceux d'un bassin versant. Mis à part l'échelle, l'unique différence réside dans l'hypothèse de l'absence de retenue d'eau sous forme de poches liquides au sein d'une PCV_H (de type nappe phréatique). Basée sur la notion de bilan hydrique [JATON, 1982], la figure 2.7 présente l'algorithme généralisé des transferts hydriques associés à une PCV_H.

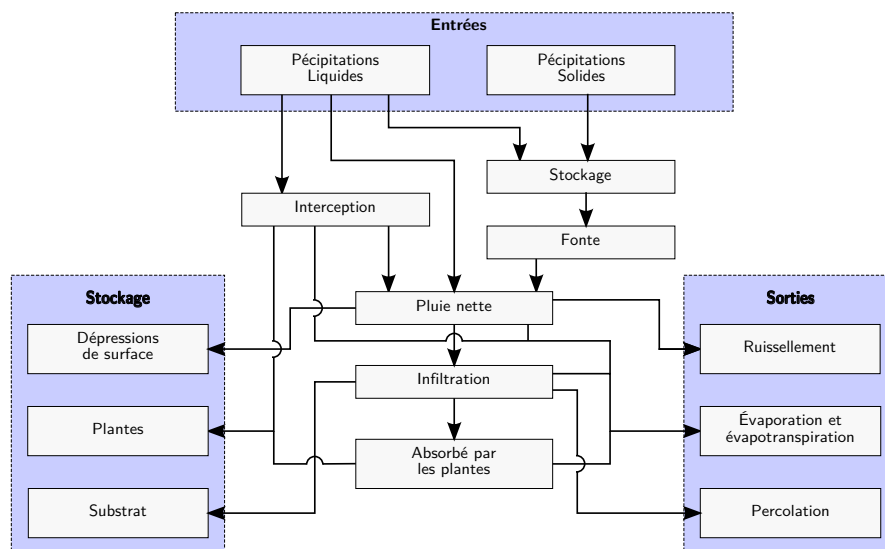


Figure 2.7 – Modèle général de transfert hydrique associé aux PCV_H.

L'eau précipitée sur la PCV est en partie interceptée par le couvert végétal ou tout autre objet présent. Au contact de ces objets, une part de cette eau s'évapore, une autre est absorbée, et le reste s'écoule alors jusqu'au substrat rejoignant la pluie n'ayant pas été interceptée. Dans le cas de précipitations solides, celles-ci sont stockées sur la PCV jusqu'à leurs fontes. Hors pertes de neige dues au vent, toute l'eau, alors devenue liquide, se retrouve sur le substrat. Au contact du substrat, l'eau (de pluie ou de fonte) a la capacité de s'évaporer, de ruisseler ou de s'infiltrer en fonction des conditions physiques de ce dernier (taux de saturation en eau,

gel, *etc.*). Lors de l'infiltration, une partie de l'eau est stockée dans le substrat, retenue par le milieu sous forme de vapeur d'eau, par capillarité ou sous forme de poches d'eau liquide. Une fois le substrat saturé en eau, il y a percolation. Toute infiltration supplémentaire traverse alors le substrat de part en part puis s'écoule sur son support.

Suivant cette conception de bilan, et dans une approche hydrologique, le ruissellement en surface de la PCV, donc du substrat (\dot{R}_{H_2O}), est donné par l'équation 2.3. \dot{R}_{H_2O} est également nommée lame ruisselée dans le cas d'une expression en fonction des hauteurs d'eau. Elle est fonction du débit d'eau arrivant sur la PCV_H (\dot{A}_{H_2O}), de l'eau interceptée par les feuilles ($\dot{I}t_{H_2O}$), de l'eau infiltrée dans le substrat ($\dot{I}_{H_2O}^s$) ainsi que l'eau stockée dans les dépressions de surface ($\dot{S}_{H_2O}^{ss}$).

$$\dot{R}_{H_2O} = \dot{A}_{H_2O} - [\dot{I}t_{H_2O} + \dot{I}_{H_2O}^s + \dot{S}_{H_2O}^{ss}] \quad (2.3)$$

Où $\dot{I}_{H_2O}^s$ est défini (bilan de matière) par les débits d'eau stockés dans le substrat ($\dot{S}_{H_2O}^s$), absorbés par les plantes ($\dot{Q}_{H_2O}^s$), évaporés dans/sur le substrat ($\dot{E}_{H_2O}^s$) ainsi que percolés (\dot{P}_{H_2O}).

$$\dot{I}_{H_2O}^s = \dot{S}_{H_2O}^s + \dot{Q}_{H_2O}^s + \dot{E}_{H_2O}^s + \dot{P}_{H_2O} \quad (2.4)$$

L'apparente simplicité de cette équation cache la difficile caractérisation des valeurs la composant⁵³.

2.2.2.3 Impact de la végétation

La présence de la végétation est un élément important, mais également complexe à prendre en considération. Ceci est dû au fait que cet élément est composé d'un ensemble d'êtres vivants. La particularité de ceux-ci étant d'avoir un rapport au temps particulier (période de pousse, saisonnalité, cycles circadiens), ainsi qu'une forte dépendance aux conditions dans lesquelles ils évoluent due à leurs besoins physiologiques. En effet, l'irradiation, la température, l'humidité relative de l'air, la pluviométrie (*etc.*) sont autant de facteurs impactant le comportement et le bien-être des plantes.

La caractérisation dynamique de la couche est donc peu aisée⁵⁴. La figure 2.8 présente une synthèse des interactions inhérentes aux plantes.

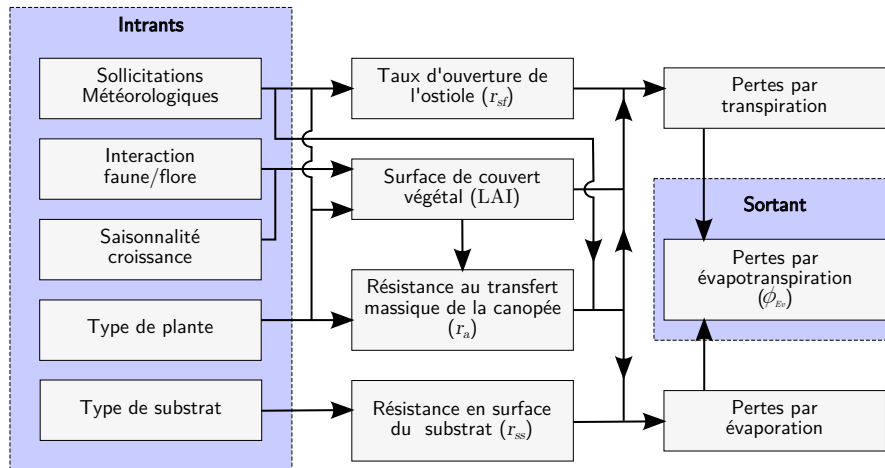


Figure 2.8 – Modèle général des pertes par évapotranspiration associée à la présence de végétation sur la PCV_H.

La végétation impacte donc le transfert thermique dans la PCV_H de trois manières. La première se rapporte à l'ombre portée du couvert végétal sur le substrat, réduisant l'élévation de la

53. De nombreux modèles existent concernant les bassins versants. Ceux-ci sont répertoriés dans l'ouvrage de SINGH [SINGH et FREVERT, 2006].

54. Pour cette raison, les modèles mis en place sont principalement de type empirique.

température de ce dernier et l'évaporation de l'eau contenue. La seconde est relative à la canopée, dont la transpiration diminue la température locale *via* l'énergie latente de vaporisation. Enfin, la canopée réduit les échanges thermiques et massiques, notamment *via* la protection contre la convection forcée (action du vent à la surface du substrat). La réduction du renouvellement d'air limitant ainsi les capacités d'évaporation de l'eau du substrat.

2.2.2.4 Couplage

Les modèles généraux présentés précédemment sont en réalité couplés au sein de la PCV_H. Ce couplage est dû à l'ombre portée inhérente à la végétation ainsi qu'au fait que les transferts massiques sont également vecteurs d'un transfert énergétique en leur sein (énergie sensible et latente⁵⁵). Les figures 2.9 et 2.10 présentent de façon synthétique l'imbrication de ces transferts⁵⁶, où φ représente une densité de flux thermique et \dot{X} un débit volumique surfacique ($m^3.m^{-2}.s^{-1}$).

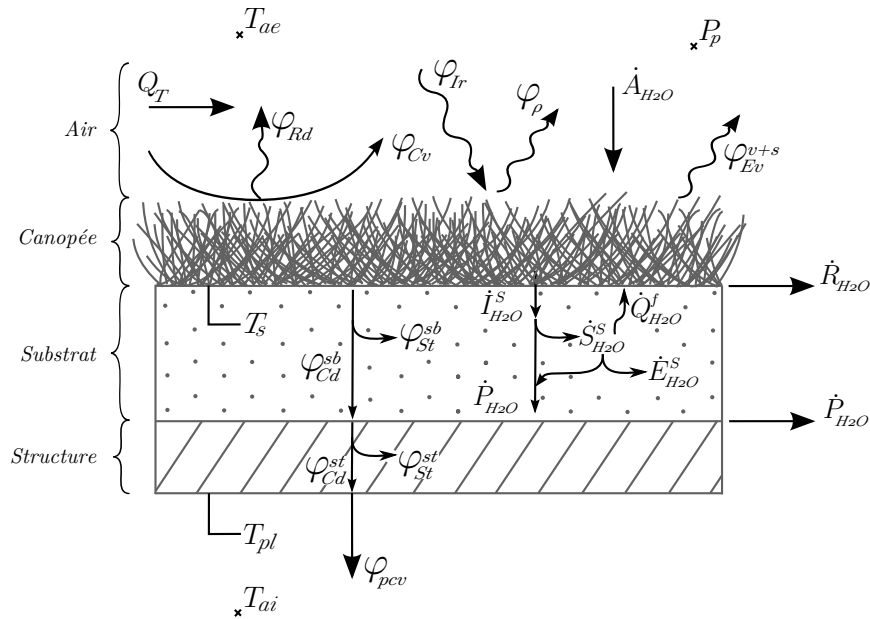


Figure 2.9 – Représentation générale des transferts massiques et thermiques associés aux PCV_H.

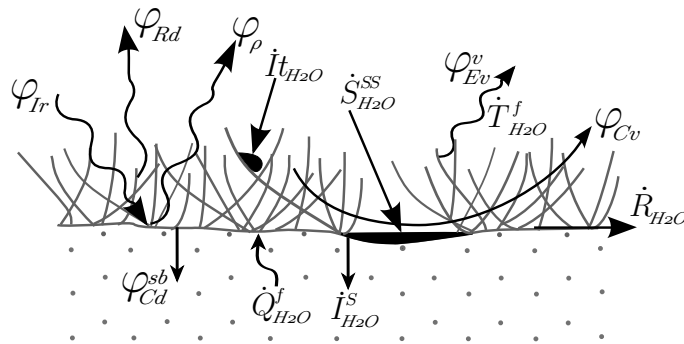


Figure 2.10 – Agrandissement de la représentation générale des transferts massiques et thermiques à l'interface substrat – canopée.

55. L'énergie associée au moment cinétique de l'eau est négligée au regard des vitesses de transfert et densités associées (phase liquide ou vapeur).

56. La signification des symboles est indiquée dans la nomenclature page xxvii.

Le couplage entre ces deux types de grandeurs se fait par le biais d'un bilan d'enthalpie spécifique rapporté à la durée d'acquisition du volume considéré (Eq. 2.5).

$$\varphi = [h_{V_{H_2O}}^s - h_*^s] \rho_{H_2O} \dot{V}_{H_2O} \quad (2.5)$$

Où \dot{V}_{H_2O} est le débit d'eau considéré, $h_{V_{H_2O}}^s$ est l'enthalpie spécifique relative aux conditions de V_{H_2O} et h_*^s est l'enthalpie spécifique de référence⁵⁷.

2.2.3 Les modèles de PCV déterministes simplifiés présents dans la littérature

La modélisation des PCV peut être faite selon les cinq approches présentées section 2.2.1.2. Considérant l'axe de recherche développé durant la thèse et le fait que la quasi-totalité des modèles publiés soient de type semi-détaillé, la présente sous-section est alors dédiée à ces derniers.

Les modèles semi-détaillés définissent une approche basée sur des bilans conservatifs tels que ceux présentés dans la sous-section précédente. Ils sont donc de types physiques ou semi-physiques. Par ailleurs, ils sont eux-mêmes basés sur des modèles détaillés, semi-détaillés, simplifiés, empiriques ou stochastiques en fonction des besoins et des possibilités. Il résulte de cette liberté de choix un grand nombre de combinaisons concernant la composition finale du modèle⁵⁸.

L'objet de la présente sous-section consiste alors à présenter les principales études suivant cette approche, expliciter leurs organisations, leurs hypothèses simplificatrices et à nommer les sous-modèles qui les composent. Enfin, dans un souci de précision, les modèles principaux composants les modèles les plus performants sont également présentés.

2.2.3.1 Les hypothèses simplificatrices

Dans la littérature, selon les modèles, diverses simplifications sont effectuées. Elles proviennent d'une sélection parmi les hypothèses suivantes :

1. La répartition des plantes et l'épaisseur du substrat sont homogènes sur toute la surface de la PCV,
2. Les transferts massiques et thermiques se font selon l'axe vertical, rendant ainsi les transferts horizontaux négligeables,
3. L'air au contact de l'ostiole⁵⁹ est saturé,
4. Les réactions biochimiques (photosynthèse, *etc.*) produisent un flux thermique négligeable,
5. Le transfert conductif dans les plantes (tiges, feuilles) est négligeable,
6. Les plantes sont correctement irriguées, en bonne santé, et ont terminé leur croissance,
7. La distribution d'eau dans la canopée est homogène,
8. La surface du substrat est libre, il n'y a pas de paillis (la terre est nue),
9. Le substrat est totalement recouvert par les plantes,
10. Le régime est quasi-statique,
11. L'inertie thermique du substrat est négligeable,
12. L'évaporation dans le substrat est négligeable,
13. La canopée est un milieu semi-transparent multicouche (toutes homogènes),

⁵⁷. C'est à dire l'énergie associée à la quantité d'eau considérée comme référence pour le calcul du bilan d'énergie (souvent A_{H_2O})

⁵⁸. *Nota* : c'est la logique utilisée, basée sur la description physique des phénomènes et les hypothèses simplificatrices associées qui permet de considérer un modèle comme simplifié, et ceci, quel que soit le type de sous-modèle utilisé.

14. La canopée est une couche semi-transparente homogène non discrétisée possédant des propriétés moyennes (température, pression partielle en eau, *etc.*),
15. Le ratio du mélange binaire air-vapeur dans la canopée est constant.
16. Le mouvement de l'air est de type turbulent,
17. L'effet des gradients de pression sont négligeables,
18. L'irradiation provenant des feuilles est négligeable,

Les hypothèses les plus répandues sont l'homogénéité selon le plan horizontal ainsi que la direction verticale des flux et (Hyp. 1 et 2). Elles permettent une simplification importante puisqu'elles réduisent le modèle initialement à 3 dimensions à un modèle à 1 dimension (selon l'axe vertical). Les hypothèses 3, 4 et 5 simplifient quant à elles le transfert thermique associé à la biologie des plantes (mécanisme complexe pour une faible influence sur le système). L'hypothèse 6 induit une ombre portée et une évapotranspiration suivant le comportement « habituel » de la végétation considérée. L'hypothèse 7 permet de considérer une répartition homogène de l'eau en surface du substrat, si l'état de surface et l'angle de la PCV_H le permettent. L'hypothèse 8 implique que le débit de vapeur d'eau provenant du substrat n'est pas limité par la présence d'un paillis (ou toute autre matière organique en décomposition), sur la surface du substrat. L'hypothèse 9 considère le cas idéal d'un taux de couverture végétal à 100%. Les hypothèses 10 à 12 sont utilisées dans une approche simplifiée des phénomènes physiques présents, considérant le régime quasi-statique, l'inertie et l'évaporation du substrat négligeables. L'hypothèse 13, par opposition à l'hypothèse 14, permet de considérer de manière semi-simplifiée les transferts radiatifs au sein de la canopée. Enfin, l'hypothèse 15 induit un gradient de pression partiel de vapeur d'eau ($e_f - e_a$) constant si l'hypothèse 3 est également vérifiée. Ceci simplifie grandement les calculs, car induit une évapotranspiration constante tant que la teneur en eau dans le substrat est suffisante.

Enfin, il est également possible de simplifier le modèle par le biais de la sensibilité de la PCV_H aux transferts énergétiques. En effet, certains des phénomènes de transfert ayant un impact mineur, ceux-ci peuvent être négligés en première approximation. La figure 2.1 exprime cette sensibilité pour une PCV_H en environnement naturel selon la saison. Ces grandeurs permettent de justifier l'hypothèse 4.

2.2.3.2 L'évolution des approches

Les PCV_H peuvent être vues comme le point de rencontre, l'interface, entre différentes branches d'études scientifiques (thermique du bâtiment, hydrologie, botanique, *etc.*). De ce fait, et considérant la complexité des phénomènes, les modèles initiaux sont composés d'un assemblage de modèles modifiés pré-existants dans d'autres disciplines.

— Thermique —

Les modèles semi-détaillés sont basés sur un bilan d'énergie. Les approches les plus simples considèrent que le régime est quasi-statique et définissent la PCV comme un système monocouche [GAFFIN et al., 2005]. D'autres études décomposent la PCV_H par couches [GAFFIN et al., 2006; HOWE, 2008], typiquement : la structure, le substrat et la canopée. Certains modèles suivent cette même approche, mais en régime dynamique, car ils prennent en compte le stockage thermique associé au substrat [NAYAK et al., 1982; D'ORAZIO et al., 1998]. Cette approche par couche a la particularité de permettre de dissocier les phénomènes physiques en fonction de leur localisation, et ainsi découpler chacun des sous-modèles créés en vue de les vérifier (ex. : substrat [JIM et TSANG, 2011b]).

Concernant la canopée « la description exacte du comportement physique est quasiment impossible » [PALOMO DEL BARRIO, 1998]. De ce fait, les premiers modèles firent l'approximation

59. Ostiole : orifice du stomate permettant d'évacuer la vapeur d'eau dans l'air.

d'une couche homogène et uniforme [ZHANG et al., 1997; BEST, 1998; HERBS et al., 2008]. Puis, aux vues des erreurs associées à cette simplification, l'air et les végétaux furent considérés séparément afin de prendre en compte les échanges entre ces deux milieux [PALOMO DEL BARRIO, 1998; SAILOR, 2008; DJEDJIG et al., 2012]. Toutefois, cette approche définit la température des végétaux et de l'air environnant comme des moyennes au sein de la canopée. Une description plus fine est alors proposée par quelques modèles; Ils discrétisent la canopée [ALEXANDRI et JONES, 2007], dont certains *via* l'équation de NAVIER-STOKES [HODO-ABALO et al., 2012]. À noter que ces derniers modèles sont les seuls à également discrétiser la couche d'air au-dessus de la canopée, les autres caractérisant cette couche uniquement par la température d'air extérieur.

Selon les approches, certains modèles décrivent plus finement les phénomènes physiques en présence, tel que l'irradiation (CLO et GLO), le transfert convectif dans la canopée, l'évapotranspiration, *etc.* [PALOMO DEL BARRIO, 1998; TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2012]. Quelques-uns de ces modèles allant jusqu'à prendre en considération la réaction photosynthétique [FENG et al., 2009].

D'une manière générale, ces modèles possèdent des lacunes quant à la précision de leurs prédictions. Ceci est dû à la représentation incomplète des phénomènes physiques à l'œuvre au sein de la PCV_H. Les transferts thermiques et massiques ayant lieu simultanément au sein du système étudié, le bilan hydrique joue alors un rôle important. Il est donc nécessaire de le considérer lors de la modélisation des transferts thermiques.

— Massique —

Les transferts massiques sont de deux ordres au sein d'une PCV_H : l'eau sous phases liquide et gazeuse présentes dans le substrat et l'eau évapotranspirée par la végétation. D'un point de vue thermique, le couplage entre les aspects hydriques et thermiques se fait par l'évolution (fortement non linéaire) des propriétés thermiques du substrat ($\lambda_s, \rho_s, c_{p,s}$), par la prise en compte de l'évapotranspiration (flux latent dû au changement de phase) et par le transfert énergétique associé aux transferts hydriques (vapeur et liquide).

Initialement sans considération hydrique [NAYAK et al., 1982; GAFFIN et al., 2005, 2006], les modèles prirent peu à peu en compte les transferts massiques (hydriques) au sein de la PCV_H. Dans un premier temps avec une teneur en eau dans le substrat constante [PALOMO DEL BARRIO, 1998], puis évolutive, modélisant également le déplacement de l'eau dans le substrat [TAKEBAYASHI et MORIYAMA, 2000]. Par simplification, nombre de ces modèles ne tiennent pas compte des précipitations (ou irrigation) [TAKEBAYASHI et MORIYAMA, 2000; ALEXANDRI et JONES, 2007]. Toutefois, les modèles les plus récents considèrent ces phénomènes [LAZZARIN et al., 2005; SAILOR, 2008; DJEDJIG et al., 2012]. D'une manière générale, certaines études [SAILOR, 2008] considèrent les transferts de masse par le biais d'une adaptation du modèle de transfert sol-végétation-atmosphère (SVAT) utilisé dans les études météorologiques à méso-échelle ou dans les modèles généraux de circulations [PIELKE, 2002].

Ces transferts induisent une évolution de la teneur en eau du milieu, modifiant les propriétés thermiques du substrat. Certaines études prennent en compte cet impact, calculant les nouvelles valeurs de λ_s et $\rho_s c_{p,s}$ à l'aide de modèles empiriques [PALOMO DEL BARRIO, 1998; JIM et TSANG, 2011b; TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2012; DJEDJIG et al., 2012]. L'évolution de la teneur en eau du substrat induit l'évolution de la teneur en vapeur d'eau et donc celle du transfert thermique associé. Certaines approches considèrent que ce transfert est déjà pris en compte à travers la définition des propriétés thermiques définies [ALEXANDRI et JONES, 2007]. Selon une approche plus fine, d'autres modèles paramètrent le transfert *via* des diffusivités massiques isothermes et non-isothermes associées respectivement aux gradients de teneur en eau et de température [PALOMO DEL BARRIO, 1998].

La teneur en eau dans l'air quant à elle est initialement considérée comme une grandeur moyenne par couche (air dans la canopée et air extérieur) [PALOMO DEL BARRIO, 1998]. Puis quelques modèles l'ont décrit plus précisément, discrétisant ces couches [ALEXANDRI et JONES, 2007],

dont certains *via* l'équation de NAVIER-STOKES [HODO-ABALO et al., 2012].

— *Botanique* —

La végétation est par définition un milieu complexe à modéliser. Considérant ceci, selon les modèles, diverses hypothèses sont utilisées afin de simplifier les phénomènes physiques en présence. Les plus communes sont l'homogénéité de la couverture végétale et de sa répartition.

La grande majorité des modèles tend à utiliser la notion de LAI pour caractériser la canopée. Le LAI⁶⁰ est l'un des paramètres les plus importants lors de la modélisation d'une PCV car au cœur des phénomènes de transfert radiatif, convectif et latent (transpiration principalement). Cette grandeur adimensionnelle caractérise la densité surfacique de surface foliaire, *i.e.* le rapport de la somme de la surface des n feuilles (S_f , un seul côté considéré) par la surface issue de la projection orthogonale de la canopée (S_c^\perp) [WATSON, 1947]. Par définition, le LAI est obtenu par une approche expérimentale qui peut s'avérer impossible à mettre en œuvre⁶¹, mais d'autres approches existent, plus simples et non destructrices, tel que l'usage d'un ceptomètre⁶² ou l'imagerie satellite (pour de grandes surfaces). Pour plus d'informations sur les types de mesure et erreurs associées se référer à JONCKHEERE et al. [2004] et WEISS et al. [2004]. Pour une estimation des LAI locaux se référer à [SCURLOCK et al., 2001].

À noter qu'à grande échelle le LAI est corrélé au taux de couverture végétal ainsi qu'au NDVI⁶³ [CARLSON et RIZILEY, 1997].

$$\text{LAI} = \frac{\sum_{i=1}^n S_f(i)}{S_c^\perp} \quad (2.6)$$

L'impact de la végétation sur le champ thermique se fait principalement *via* la transpiration et la protection contre le rayonnement solaire. Concernant ce dernier point, la plupart des études utilisent la loi de BEER afin de modéliser l'atténuation de l'irradiation à travers la canopée [PALOMO DEL BARRIO, 1998; ALEXANDRI et JONES, 2007]. D'autres études prennent également en considération la densité de la canopée dans le cas où le taux de couverture ne serait pas total [SAILOR, 2008; OULDOUKHITINE et al., 2011]. Dans une approche plus fine, certaines d'entre elles combinent ces deux méthodes [TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2012].

Concernant le stockage thermique par les plantes, ce dernier est généralement négligé dans la plupart des modèles, ceux-ci faisant l'hypothèse d'un transfert thermique quasi-statique⁶⁴. De plus, le stockage par le métabolisme des plantes est également souvent négligé (Hyp. 4), car sa contribution au bilan énergétique est de l'ordre de 1% à 2% de l'irradiation nette⁶⁵ [GATES, 1980a; JONES, 1992]. Toutefois, cette valeur peut atteindre 5% dans le cas d'un LAI important et d'une faible irradiation⁶⁶ [HILLEL, 1998].

La transpiration quant à elle, est considérée de manière directe par certains modèles [PALOMO DEL BARRIO, 1998; TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2012], nécessitant alors la définition des résistances aérodynamique et stomatique associées à la canopée (toutes deux obtenues à partir de relations empiriques). Toutefois, d'autres modèles utilisent une approche simplifiée *via* la combinaison des phénomènes de transpiration et d'évaporation sous la notion d'évapotranspiration [OULDOUKHITINE et al., 2011]. Cette approche utilise des modèles empiriques tels que PENMAN-MONTEITH.

60. LAI : « *Leaf Array Index* », initialement défini afin d'indexer la répartition foliaire à l'échelle d'une zone (pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres carrés).

61. C'est typiquement le cas pour la mesure du LAI pour des conifères, ou bien la LAI associé à la canopée d'une forêt, *etc.*

62. Dédution du LAI basé sur une mesure de la transmittance de la canopée associée à la loi de BEER-LAMBER pour laquelle le coefficient d'extinction est obtenu par des modèles stochastiques ou empiriques [NORMAN, 1976; CAMPBELL, 1986]

63. NDVI : *Normalized Different Vegetation Index*. Il est défini par : $(r_v - r_i)/(r_v + r_i)$, où r_v et r_i sont les réflectances associées aux spectres visible et proche infrarouge de la surface considérée.

64. Cette approximation semble cohérente aux vues du volume des plantes, de leurs distributions spatiales et des conductivités thermiques associées (Hyp. 5).

65. Irradiation nette : somme de l'irradiation solaire (ϕ_{Ir}) et du bilan des échanges radiatifs (ϕ_{Ra}).

66. Typiquement, ce n'est pas le cas pour les PCV_H de types extensifs [TABARES-VELASCO, 2009].

Les modèles présents dans la littérature décrivent plus ou moins finement les transferts thermiques et massiques associés à la transpiration. Mais aucun d'entre eux ne prend en considération des phénomènes pouvant dans certains cas être non négligeable, tels que la photosynthèse, la respiration [FENG et al., 2010] ou bien le développement structurel (pousse). La notion « d'être vivant » n'est donc peu/pas prise en considération.

— *Analyse de sensibilité* —

Dans le processus d'optimisation du modèle créé, il est important de connaître quels sont les phénomènes prépondérants. En ce sens, l'analyse de sensibilité est un outil de choix. Toutefois, peu d'études indiquent l'utilisation de celle-ci.

Parmi celles l'utilisant [PALOMO DEL BARRIO, 1998; SAILOR, 2008; TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2012], il ressort que le LAI est l'une des variables les plus importantes⁶⁷. L'augmentation de ce paramètre diminuant la température de l'air dans la canopée [KUMAR et KAUSHIK, 2005]. Dans une moindre mesure, il semble que la teneur en eau du substrat et sa densité soient également des paramètres parmi les plus influents [PALOMO DEL BARRIO, 1998].

— *Validation* —

La complexité associée à la modélisation des PCV_H induit (actuellement) l'absence de modèle de connaissance « pur ». De plus, aucun des modèles ou codes de calculs actuels ne peut prédire précisément⁶⁸ le champ et les flux thermiques associés à une PCV_H pour une composition donnée⁶⁹. Par conséquent, la procédure de validation d'un modèle de PCV_H ne peut être que d'un seul type : expérimental.

Toutes les études recensées proposant une procédure de validation vont dans ce sens [BEST, 1998; HERBS et al., 2008; ALEXANDRI et JONES, 2007; TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2012]. Parmi celles-ci, le modèle effectué par PALOMO DEL BARRIO est l'un des plus référencés. Deux études l'ont par ailleurs expérimentalement validé [THEODOSIOU, 2003; KUMAR et KAUSHIK, 2005]. En fonction des modèles, les erreurs associées aux champs thermiques évoluent. Ils sont généralement en moyenne de l'ordre du degré [ALEXANDRI et JONES, 2007].

À noter que par définition la validation expérimentale est partielle⁷⁰, de ce fait il n'est possible de valider le modèle que pour des conditions données. Que celles-ci soient en environnement réel [HE et JIM, 2010] ou contrôlé [TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2012].

— *Code de calcul* —

La grande majorité des modèles validés ont pour but d'être intégrés à un code de calcul permettant la simulation de la performance énergétique d'un bâtiment. Que ce dernier soit destiné à être utilisé de manière restreinte (ISOLAB⁷¹) ou bien déployé à grande échelle (TRNSYS, ENERGY PLUS, etc.).

Actuellement seuls quelques codes de calculs permettent de considérer les PCV_H. Ceux-ci sont présentés de manière non exhaustive par la table 2.4. Les modèles associés sont présentés table 2.5.

Les modèles créés pour la simulation des PCV_H sont intégrés à des codes de calcul robustes et reconnus par la communauté scientifique. Il s'agit principalement TRNSYS, d'ENERGY PLUS

67. Considérant que pour une toiture traditionnelle le phénomène prépondérant est l'irradiation ; Et sachant que le LAI intervient dans les phénomènes de convection, d'évaporation (ombre portée) et de transpiration ; L'importance de l'influence de ce paramètre semble donc cohérente.

68. *Id est* : prédiction du champ thermique ayant une erreur inférieure à 1°K.

69. Associée à une localisation donnée par le biais d'un fichier météorologique.

70. En effet, une validation totale inclurait le test de toutes les combinaisons possibles des variables du modèle testé, qu'elles soient météorologiques ou structurelles.

71. ISOLAB est un code de calcul, une plateforme expérimentale implémentée en Matlab, permettant de tester les modèles avant intégration à CODYRUN [MIRANVILLE, 2002]. Dans un premier temps, le modèle développé durant cette thèse est implémenté sous ISOLAB (Cf chapitre IV, section 5.1).

Table 2.4 – Liste des principaux codes de calcul intégrant un modèle de PCV_H

Nom	Modèles présents	Commentaires
ENERGY PLUS	[SAILOR, 2008]	Modèle physique
TRNSYS	[DJEDJIG et al., 2013] [LAZZARIN et al., 2005]	Modèles physiques
ESP-R	[SAIZ et al., 2006] [GAFFIN et al., 2005, 2006]	Modèles semi-physiques

et d'ESP-R. Implémenté en Fortran, TRNSYS est un programme modulaire payant ayant l'avantage de faciliter la création de nouveaux « composants » adaptés aux besoins. Le composant « VegEnvelope » [DJEDJIG et al., 2013] développé pour l'implémentation du modèle proposé par OULDBOUKHITINE en est l'exemple typique.

Également implémenté en Fortran 90 durant 17 ans, puis réécrit ⁷² en C++, ENERGY PLUS est la propriété du département de l'énergie des États-Unis d'Amérique et gratuitement accessible. Modulaire (dû au Fortran) il peut être associé à diverses applications facilitant son utilisation, tel GOOGLE-SKETCHUP (*via* OpenStudio), DesignBuilder (*etc.*).

Enfin, ESP-R est un programme sous licence *GNU public* créé par l'Université de STRATHCLYDE. Bien que multiplateforme et extrêmement modulaire, ESP-R est peu utilisé. Ceci provenant principalement du fait de son utilisation mal aisée due à une interface peu intuitive. À noter que l'approche sous-jacente est basée sur une discrétisation en volume fini.

2.2.3.3 Synthèse des modèles déterministes simplifiés

D'une manière globale, les modèles basés sur des bilans conservatifs possèdent des similarités. Afin d'obtenir une bonne représentation de leurs points communs et de leurs différences, le tableau 2.5 récapitule les principaux modèles de PCV_H semi-détaillés. De façon synthétique, ces modèles développent des approches dont la finesse est inhérente aux hypothèses posées. Le choix de ces dernières provenant principalement de la description de la PCV_H, *i.e.* : la caractérisation de ses couches et des phénomènes associés.

Concernant la description, les modèles présentés subdivisent généralement la PCV_H en quatre couches ⁷³. Ils discrétisent alors la structure et le substrat, mais considèrent l'air extérieur et la canopée comme des couches uniformes (valeurs moyennes) [SAILOR, 2008]. Toutefois, quelques modèles discrétisent la canopée [HE et JIM, 2010], mais aussi l'air extérieur [ALEXANDRI et JONES, 2007].

Il est à noter que certains des modèles présentés sont partiels quant à la description d'une PCV_H. En effet, il manque généralement la structure [SAILOR, 2008; TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2012]. D'un point de vue phénoménologique, cette approche permet de focaliser l'étude sur les couches les plus complexes de la PCV_H : le substrat et la végétation. Mais dans certains cas, ceci est simplement dû à l'implémentation du modèle proposé. Par exemple, intégré à ENERGY PLUS, le modèle de SAILOR utilise les modules déjà implémentés pour simuler la couche structure (et substrat). Capitalisant ainsi les travaux existants (déjà validés), le module créé pour les PCV_H se charge alors de calculer les températures et flux en surface du substrat afin de les communiquer au module adéquat sous forme de conditions aux limites à chaque pas de temps. Cette approche par capitalisation modulaire est également pertinente pour ESP-R ou TRNSYS [DJEDJIG et al., 2013].

⁷². La première version d'EnergyPlus en C++ est la 8.2.0. Selon le DOE (département de l'énergie des USA) elle possède de meilleures performances (20% supérieures à la 8.1.0) et une amélioration de la plateforme de développement.

⁷³. Une PCV_H est classiquement décrite par les couches : structure, substrat, végétation et air.

Concernant les phénomènes, une description physique fine tendrait à caractériser la PCV_H selon une description tridimensionnelle, dont chacune des grandeurs serait définie en tout point par un champ de scalaires. Toutefois, dans une approche simplifiée, les modèles présentés considèrent la PCV_H comme spatialement uniforme dans le plan. La description est donc monodimensionnelle selon l'axe vertical. Pour une couche donnée, les champs thermiques et hydriques (si bilan massique) sont alors respectivement caractérisés par un vecteur, dans le cas d'une discrétisation, ou un scalaire dans le cas contraire. Cette approche conduit également à la simplification des champs associés aux données météorologiques (pression partielle, vitesse et direction du vent, *etc.*) qui sont alors généralement considérées comme des scalaires évoluant temporellement (valeurs moyennes). Cependant, malgré cette approche simplificatrice, certains modèles couplent un bilan de masse au bilan énergétique afin de décrire plus finement les transferts thermiques dus aux transferts hydriques (évaporation, transpiration, diffusivité thermique, *etc.*). Tout comme le bilan énergétique, le bilan hydrique est fonction de la description des couches de la PCV_H (discrétisation ou non).

Dans le but de permettre une comparaison précise des approches utilisées par les modèles présentés, les plus performants sont détaillés dans le tableau 2.6. Les liens, les différences et les évolutions entre les modèles de transport utilisés deviennent alors perceptibles. Ceux-ci dépendent principalement des grandeurs suivantes :

- la résistance à l'évaporation du substrat ⁷⁴ (r_{ss}) ;
- la résistance stomatale de la canopée ou résistance à la transpiration (r_{sc}) ;
- la résistance aérodynamique associée à la canopée (r_a) ;
- la diffusivité thermique et massique du substrat (D_s^t, D_s^m).

À noter que tous les modèles détaillés (Tab. 2.6) utilisent la loi de BEER ⁷⁵ afin de caractériser le flux radiatif transmis à travers la canopée. Les coefficients d'extinctions associés aux courtes longueurs d'onde (k_{clo}) et aux grandes longueurs d'onde (k_{glo}) sont généralement dissociés (obtenus expérimentalement). De plus, vis-à-vis des échanges infrarouges, le substrat et la végétation sont considérés comme des plans infinis parallèles.

⁷⁴. Sous l'effet de l'évaporation la surface du substrat s'assèche, modifiant la capacité de celui-ci à évacuer la vapeur d'eau qu'il contient.

⁷⁵. Loi de BEER : $\varphi = \varphi_0 e^{-k LAI}$

Table 2.5 – Liste des modèles basés sur des équations de bilans.

Modèle	Bilan	Évapotranspiration	Hyp. ⁷⁶	Discrétisation	Commentaires
HODO-ABALO et al. [2012]	Thermique et Massique	NAVIER-STOCKES et résistance stomatale	1, 2, 4 et 16:18	Air, canopée, substrat et structure	Flux turbulent, utilisation des équations de NAVIER-STOCKES.
DJEDJIG et al. [2012]	Thermique et Massique	DPVs ⁷⁷ et résistances (stomatale et aérodynamique)	1 à 6 12 et 14	Substrat	Fraction massique homogène dans le substrat. Basé sur TABARES-VELASCO et OULDBOUKHITINE.
TABARES-VELASCO et SREBRIC [2012]	Thermique	DPV ⁷⁸ et résistances (stomatale et aérodynamique)	1:2, 4:7, 10:11 et 14	Substrat	Quasi-statique. Focalise sur les transferts externes. Basé sur ALEXANDRI et PALOMO.
OULDBOUKHITINE et al. [2011]	Thermique et Massique	Th : DPV + résistances ⁷⁹ M : PENMAN-MONTEITH	11, 14 et 15	Substrat	Modification du modèle de SAILOR pour le calcul de λ_s . Ajout d'un bilan hydrique.
HE et JIM [2010]	Thermique	Ratio de BOWEN	1, 9 et 13	Plantes	Modèle de protection solaire basé sur la théorie des ondes électromagnétiques.
FENG et al. [2010]	Thermique	Coefficient d'évaporation	1, 2, 5 6 et 9	/	Coefficient d'évaporation obtenu expérimentalement. Photosynthèse et respiration considérée.
SAILOR [2008]	Thermique et Massique	DPVs et résistances (stomatale et aérodynamique)	11, 14 et 15	Substrat	Approche des phénomènes principalement semi-physiques. Présent dans ENERGY PLUS.
ALEXANDRI et JONES [2007]	Thermique et Massique (sans pluie)	DPVs et résistances (stomatale et aérodynamique)	1:8 et 18	Air, canopée, substrat et structure	Basé sur PALOMO, simplifié et complété (bilan massique et discrétisation des plantes).
GAFFIN et al. [2005, 2006]	Thermique	Ratio de BOWEN	9 et 14	/	Canopée considérée comme une condition aux limites <i>via</i> le ratio de BOWEN.
LAZZARIN et al. [2005]	Thermique et Massique	PENMAN modifié et coefficient de culture (k_c)	1, 2 et 14	Substrat, membranes et structure	Modèle basé sur celui présenté dans la thèse de CASTELLOTTI [2003].
TAKEBAYASHI et MORIYAMA [2000]	Thermique et Massique (sans pluie)	PHA ⁸⁰ et coefficient d'évaporation	12 et 14	/	Bilans à l'échelle de la PCV _H . Coefficient d'évaporation constant et empirique.
PALOMO DEL BARRIO [1998]	Thermique et Massique (sans pluie, $W_{act} = cst$)	DPV et résistances (stomatale et aérodynamique)	1, 2, 6 7 et 14	Substrat et structure	Approche des phénomènes par des modèles principalement physiques. Modèle le plus cité.
NAYAK et al. [1982]	Thermique	DPV et corrélation aérodynamique	1, 4	Substrat	/

Nota : La classification de ces modèles est délicate, car elle dépend des types de sous-modèles utilisés (qui ne sont pas nécessairement homogènes). Toutefois, la discrétisation des couches et un indicateur permettant de faire ressortir les cas où la canopée est considérée comme une condition aux limites de ceux où c'est une couche à part entière.

⁷⁶ La liste des hypothèses est présente page 37.

⁷⁷ DPVs : Modèle basé sur la différence de pression partielle en vapeur d'eau entre le milieu considéré (à saturation) et l'air environnant (ex : surface de la feuille et air dans la canopée).

⁷⁸ DPV : Identique à DPVs pour une pression partielle en surface non saturée.

⁷⁹ Il s'agit des résistances stomatale (r_{sc}) et aérodynamique (r_a) associées à la canopée.

⁸⁰ PHA : Potentiel d'humidité relative. Pourcentage de la pression partielle accessible pour l'évaporation avant saturation de l'air en vapeur eau.

Table 2.6 – Détail des modèles de transfert utilisés dans les modèles de PCV les plus performants.

Phénomène	DJEDJIG et al. [2012]	TABARES-VÉLASCO et SREBRIC [2012]	SAILOR [2008]
Irradiation	$k_{clo} \neq k_{glo}$ $T_c = [\sigma^{-1} \varphi_{Ciel}]^{1/4}$ $\epsilon_{ss} \neq \epsilon_f \neq \epsilon_{ciel} = 1$	$k_{clo} \neq k_{glo}$ (valeurs non indiquées) $T_c = [\sigma^{-1} \varphi_{Ciel}]^{1/4}$ et $\epsilon_{ss} \neq \epsilon_f \neq \epsilon_{ciel} = 1$	Non indiqué
Convection thermique (φ_{Cv}^t)	Air/Air canopée : $LAI \frac{\rho_a C_{p,a}}{r_a} [\bar{T}_f - T_a]$ Substrat/Air canopée : $\frac{\rho_a C_{p,a}}{r_a + r_{ss}} [\bar{T}_{c,a} - T_{ss}]$	Air/Air canopée : $1,5 LAI H_{cv} [\bar{T}_f - T_a]$ Substrat/Air canopée : $\frac{H_{cv} H_{veg}}{H_{cv} + H_{veg}} [\bar{T}_{c,a} - T_{ss}]$ Substrat/Air : $H_{cv} [T_{ss} - T_a]$	Air/Air canopée : $\frac{1,1 LAI(\rho_a + \rho_f) C_{p,a}}{2[0,3 + Vi_f]^{-1} 100} [\bar{T}_{c,a} - \bar{T}_f]$ Substrat/Air canopée : $\frac{(\rho_a + \rho_s) C_{p,a}}{2 r_{ss}^t} [\bar{T}_{c,a} - T_{ss}]$
Impact de la diffusion massique (φ_{Dm}^t)	/	/	/
Évapotranspiration (φ_{ET})	Canopée : $LAI \frac{\rho_a C_{p,a}}{\zeta(r_a + r_{sc})} [\bar{e}_f^{sat} - e_a]$ Substrat : $\frac{\rho_a C_{p,a}}{\zeta(r_a + r_{ss})} [e_{ss}^{sat} - e_a]$	Canopée : $LAI \frac{\rho_a C_{p,a}}{\zeta(r_a + r_{sc})} [\bar{e}_f - e_a]$ Substrat : $\frac{\rho_a C_{p,a}}{\zeta(r_a + r_{ss})} [e_{ss} - e_a]$	Canopée : $\frac{L_v LAI 0,5(\rho_a + \rho_f) r_a}{100[0,3 + Vi_f]^{-1} (r_a + r_{sc})} [\omega_f^{sat} - \omega_{c,a}]$ Substrat : $\frac{L_v(\rho_a + \rho_s)}{2 r_{ss}^t} [\omega_{ss} - \omega_{c,a}]$
Résistance aérodynamique (r_a)	$r_a = \frac{\ln \left[\frac{Z_v - Z_0}{Z_{r,c}} - \psi_m \right] \cdot \ln \left[\frac{Z_{ht} - Z_0}{Z_{r,c}} - \psi_e \right]}{V_z \cdot (C_{vk})^2}$ $r_a = \ln \left[\frac{Z_v - Z_0}{Z_{r,c}} \right] \cdot \left[V_z \cdot (C_{vk})^2 \right]^{-1}$	$r_a = f(N_u)$ (Non indiquée)	$r_a = \frac{100}{0,3 + Vi_f}$
Résistance stomatale de la canopée (r_{sc})	$r_{sc} = \frac{r_{sc}^{min}}{LAI} f_1(\varphi_{sol}) f_2(\bar{T}_f) f_3(\omega_s) f_4(\bar{e}_f - e_a)$	$r_{sc} = \frac{r_{sc}^{min}}{LAI} f_1(\varphi_{sol}) f_2(\bar{T}_f) f_3(\omega_s) f_4(\bar{e}_f - e_a)$	$r_{sc} = \frac{r_{sc}^{min}}{LAI} f_1(\varphi_{sol}) f_2(\bar{e}_f^{sat} - e_a) f_3(\omega_s)$
Résistance en surface du substrat (r_{ss})	$r_{ss}^t = [\xi_1 + \xi_2 Vi_f]^{-1}$ $r_{ss}^m = \xi_3 + \xi_4 \left(\frac{\omega_s}{\omega_s^{sat}} \right)^{-\xi_5}$	$r_{ss} = \xi_3 + \xi_4 \left(\frac{\omega_s}{\omega_s^{sat}} \right) + \xi_5$	$r_{ss}^t = \frac{[Vi_f C_{vk}^2 \kappa_{at}^t]^{-1}}{\left[\frac{(1 - \sigma_c)/Z_{r,c}}{\ln(Z_v/Z_{r,c})} \right]^2 + \frac{\sigma_c}{\ln(Z_v - Z_0)/Z_{r,c}}^2}$ $r_{ss}^m = \frac{[Vi_f \kappa_{at}^t]^{-1}}{\left[\frac{(1 - \sigma_c) C_{vk}}{C_{vk}^2} + \frac{\sigma_c}{\ln(Z_v - Z_0)/Z_{r,c}} \right]^2}$
Diffusivité du substrat (D_s)	Th : $D_s^t = \frac{\lambda_{sec} + \omega_s \lambda_e}{C_{p,e}(0,2 - \omega_s) \rho_s}$ M : D_s^m non indiquée	D_s^t non indiqué, mais λ_s oui $\lambda_s = \xi_1 + \omega_s \xi_2$ (approche quasi-statique)	Non indiqué (Fait par ENERGY PLUS)

– Note : Symboles des formules possiblement modifiés afin de respecter l'homogénéité de la nomenclature. –

Table 2.5 – Détail des modèles de transfert utilisés dans les modèles de PCV les plus performants. (suite)

Phénomène	ALEXANDRI et JONES [2007]	PALOMO DEL BARRIO [1998]
Irradiation	$k_{glo} = k_{clo}$ et $\epsilon_{ss} \neq \epsilon_f \neq \epsilon_{ciel} = 1$	k_{clo} empirique. $k_{glo} = k_{clo} \left[(1 - \tau_f)^2 - \varrho_f^2 \right]^{1/2}$ $\varrho_c = \left[1 - e^{-k_{glo} LAI} \right] \varrho_c^*$ et $\epsilon_{ss} = \epsilon_f = \epsilon_{ciel} = 1$
Convection thermique (φ_{Cv}^t)	Air/Canopée : $H_{cv} [T_{c,a} - T_a]$ Feuilles/Air canopée : $\rho_a C_{p,a} (r_a H)^{-1} [T_f - T_{c,a}]$ Canopée/Substrat : $\rho_a C_{p,a} (r_{ss})^{-1} [T_{ss} - T_{c,a}]$	Air/Canopée : $h_c T_{x,c} \rho_a C_{p,a} [\bar{T}_{c,a} - T_a]$ Feuilles/Air canopée : $2 LAI \frac{\rho_a C_{p,a}}{r_a} [\bar{T}_f - \bar{T}_{c,a}]$ Canopée/Substrat : $H_{cv} [T_{ss} - \bar{T}_{c,a}]$
Impact de la diffusion massique (φ_{Dm}^t)	Air/Canopée : $(C_{p,e} - C_{p,a}) \rho_a D_{a,v}^m [q_{c,a} - q_a] [T_{c,a} - T_a]$ Canopée/Substrat : $(C_{p,e} - C_{p,a}) \rho_a D_{a,v}^m [q_{ss} - q_{c,a}] [T_{ss} - T_{c,a}]$	/
Évapotranspiration (φ_{ET})	Canopée : $\frac{\rho_a C_{p,a}}{\zeta(r_a + r_{sc})} [\bar{e}_f^{\text{sat}} - e_a]$	Canopée : $2 LAI \frac{\rho_a C_{p,a}}{\zeta(r_a + r_{sc})} [\bar{e}_f - e_a]$
Résistance aérodynamique (r_a)	Non indiqué	$r_a = \xi_1 \left[l_f \right]^{\xi_2} \left[l_f \bar{T}_f - \bar{T}_a + \xi_3 V_{t_c}^2 \right]^{-\xi_4}$
Résistance stomatale de la canopée (r_{sc})	$r_{sc} = \frac{r_{sc}^c}{LAI_a} \left[\frac{\varphi_{max}^{max}}{0.03 \varphi_{tr}^{max} + \varphi_{tr}} + P + \left(\frac{\omega_f^f}{\omega_{s,r}^{min}} \right)^2 \right]$ $r_{sc} = \frac{r_{sc}^{min}}{LAI_a} \left[1 + \left(\frac{200}{\varphi_{sol} + 0.1} \right)^2 \right] \cdot \frac{400}{T_{a,c} (40 - T_{a,c})} \frac{D_v}{D_q}$	r_{sc} non indiquée, mais r_{sf} oui $r_{sf} = r_{sf}^{min} f_1(\varphi_{sol}) f_2(\text{CO}_2) f_3(\bar{T}_f) f_4(\bar{e}_f - e_a)$
Résistance en surface du substrat (r_{ss})	$r_{ss} = 200 \left(\frac{\omega_s}{\omega_s^{\text{sat}}} \right)^{-1,6}$	/
Diffusivité du substrat (D_s)	Th : $D_s^t = \frac{\max\{418 \exp(-\log_{10} \psi_s - 2,7), 0,172\}}{(1 - \omega_s^{\text{sat}}) \rho_s C_{p,s} + \omega_s \rho_e C_{p,e}}$ M : $D_s^m = \frac{-b K_s^{\text{sat}} \omega_s^{\text{sat}}}{\omega_s^{\text{sat}}} \cdot \left(\frac{\omega_s}{\omega_s^{\text{sat}}} \right)^{b+2}$	Th : $D_s^t = \frac{2,1 \left(\frac{\rho_s}{1000} \right)^{(1,2-2\omega_s)} e^{-0,7(\omega_s-0,2)^2} + \left(\frac{\rho_s}{1000} \right)^{(0,8+2\omega_s)}}{4180 (0,2+\omega_s) \rho_s \cdot 10^{-7}}$ M : $D_s^m = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_s^*} \right) 100 \frac{\xi_5 D_{a,v}^m L_v}{(C_{p,v})^2 T_s} \frac{P_a \bar{e}_s}{F_a - \bar{e}_s}$

– Note : Symboles des formules possiblement modifiés afin de respecter l'homogénéité de la nomenclature. –

Contexte et état de l'art

Section 3

Problématique

3.1 Le sujet

Dans un contexte global nécessitant une diminution des consommations énergétiques, associé à un besoin local de maîtrise de l'énergie (objectif : autonomie énergétique pour 2030), l'utilisation des parois végétalisées est une solution adéquate à bien des égards (Cf. section 1.2.2).

Par exemple, le secteur résidentiel représente plus de 44% de la consommation énergétique de l'île (dont la gestion est rendue délicate par l'insularité), principalement associée à la climatisation ou au chauffage selon les zones géographiques. Selon la littérature, les parois végétalisées sont en mesure d'isoler le bâti, limitant la surchauffe, mais elles ont également la capacité d'agir comme une pompe à chaleur (selon la composition de la PCV et les conditions climatiques). À noter que l'île de La Réunion est caractérisée par un climat variant de tropical humide à tempéré selon l'altitude et possédant plus de 200 microclimats. Il serait donc possible d'adapter spécifiquement cette technologie passive aux contraintes locales afin de diminuer la consommation énergétique globale. De plus, l'usage des parois végétalisées apporte des réponses écologiques et passives à divers maux urbains, tels que l'isolation naturelle du bâti (thermique et acoustique), la retenue et le déphasage des eaux de pluies, la réduction des particules contenues dans l'air, où bien la réduction de la surchauffe urbaine (très présente dans les bas de l'île) [JEAN et MIRANVILLE, 2011].

Toutefois, les PCV_H^1 sont des systèmes complexes. Et bien que les études sur ce sujet soient nombreuses, elles sont également assez récentes. De plus, elles ne permettent pas de prédire précisément leurs comportements thermiques. C'est notamment le cas dans le contexte du climat tropical humide de l'île de La Réunion, pour lequel aucun modèle n'existe. Ceci est en partie expliqué par l'absence des PCV dans les traditions constructives locales ; ce qui induit la nécessité d'adapter le système aux habitudes constructives réunionnaises (toitures en tôle).

Dès lors, les présents travaux s'inscrivent dans une démarche initiée en Allemagne voilà plus de 40 ans. Scientifiquement, l'objectif de ces recherches est d'apporter une pierre à l'édifice de la compréhension des PCV. Pour ce faire, le sujet inhérent à la présente thèse s'intitule :

« Contribution à l'Étude des Parois Complexes Végétalisées (PCV) : Évaluation de la Performance Énergétique Globale en Climat Tropical Humide »

Nécessaires à la compréhension de la problématique établie, les notions de contexte et d'objectifs associés à la thèse sont abordés dans les sections suivantes.

1. Pour plus d'information sur la nomenclature des « Paroi Complexe Végétalisée » se reporter au chapitre II section 1.

3.2 Objectifs des recherches

— Domaine d'étude —

Les PCV sont un sujet d'étude extrêmement vaste, dont les implications sur l'environnement et l'homme vont de l'effet d'îlot urbain à la pollution de l'air, en passant par la biodiversité ainsi que la santé psychologique des habitants. Dans ce contexte, notre étude se focalise uniquement sur l'impact thermique associé à ce système. Et plus particulièrement sur la prédiction de l'évolution du champ thermique d'une PCV_H (extensive ou lisseuse²) en climat tropical humide³.

— Objectifs scientifiques —

Plus précisément, l'objectif de ces travaux de thèse est double. Il consiste d'une part à définir une conception de PCV adaptable à l'architecture réunionnaise, et d'autre part à établir un modèle qui puisse prédire l'évolution dynamique du champ thermique au sein de la PCV. La description est établie à partir des données météorologiques, mais également des données descriptives du bâtiment (conception et occupation). À noter que la grandeur clef recherchée est la température de surface interne au bâti (plafond), car cette variable d'état permet de définir l'intensité et le sens des flux de chaleur traversant la paroi. De plus, cette grandeur induit également la possibilité de caractériser la résistance thermique associée à une PCV_H. Enfin, ces projections comportementales posséderont idéalement une forte certitude quant aux résultats.

— Diffusion des travaux —

Au-delà du partage des connaissances scientifiques, la diffusion des travaux est susceptible de permettre la modification locale des habitudes constructives des PCV et d'en accroître les usages. Ceci, car ces derniers proposent une adaptation (partielle) des PCV au milieu local, *i.e.* vis-à-vis des contraintes architecturales et de la végétation utilisée (entre autres). En plus d'accroître la compréhension des phénomènes à l'œuvre, la création d'un tel modèle permet la diffusion d'un code de calcul robuste et simple d'utilisation⁴, qui devrait permettre de répondre aux besoins des professionnels (bureau d'études, architectes, *etc.*). *In fine*, les résultats de l'étude devraient favoriser le développement du secteur d'activité des PCV, et induire un impact économique. Ainsi, cette thèse est susceptible de participer à l'évolution du bâti Réunionnais. Car comme l'énonce CHÂTEAU LATOURS, « *Le progrès⁵ d'aujourd'hui c'est la tradition de demain* ».

3.3 Environnement de recherche

— Le laboratoire PIMENT —

Né en janvier 2010 de la fusion de différentes équipes de recherche, le laboratoire PIMENT⁶ couvre un large spectre de compétences dans le domaine de la Recherche en Génie Thermique, Génie de l'Habitat, Génie Urbain et Ingénierie Mathématique.

Dans ces domaines, son action peut être résumée par les mots-clefs suivants : énergie, physique du bâtiment, systèmes énergétiques, smart grid et smart building, matériaux, procédés et systèmes innovants, modélisation et conception.



2. La notion de PCV lisseuse est un concept innovant présenté chapitre II section 1.3.

3. Et par conséquent ses capacités d'isolation thermiques.

4. Il n'existe pas de solution logicielle performante traitant de l'aspect thermique des PCV_H actuellement.

5. Plus exactement, dans ce cas précis, le progrès définit la compréhension et l'adaptation locale d'une tradition multimillénaire présente ponctuellement aux quatre coins du monde.

6. Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie, l'environnement et le bâtiment - EA4518

Ces compétences permettent de traiter un problème énergétique d'une échelle spatiale et/ou temporelle microscopique jusqu'à l'échelle du territoire. Possédant une forte implication dans des collaborations avec des acteurs du secteur socio-économique, les travaux trouvent généralement une finalisation dans des domaines applicatifs à plus ou moins long terme.

Avec plus de 45 personnels, le laboratoire PIMENT s'impose dans ces domaines comme un acteur majeur au niveau international, national et régional. C'est le plus grand laboratoire de l'Université de La Réunion en physique. Sa mission est donc de « produire » :

- des « connaissances » : en moyenne 30 publications d'audience internationale chaque année ;
- des « chercheurs » : docteurs, post-doctorants ;
- des « ingénieurs et techniciens » en lien avec le développement et l'innovation : participation à la formation LMD/DUT/Ecole d'ingénieur ;
- des « objets » matériels et/ou logiciels scientifiques ;
- de l'activité économique : partenariats industriels, création d'entreprises innovantes ;
- de l'animation scientifique à l'échelle nationale, mais aussi internationale.

— Le groupe thématique *PhyBât* —

Au sein du laboratoire PIMENT, le groupe thématique Physique du Bâtiment (PhyBât) mène des travaux de recherche sur la conception énergétique des bâtiments à hautes performances. Il s'appuie pour cela sur une démarche combinée, alliant modélisation et expérimentation in situ dans une démarche de validation des modèles développés pour une prédiction fiable.

D'un effectif composé de 4 enseignants-chercheurs, 3 chercheurs associés et 3 doctorants, il développe les axes de travail indiqués ci-dessous et illustrés sur la Figure 1 :

- a) Modélisation enveloppe/systèmes/ambiances des bâtiments
- b) Thermo-aéraulique des parois complexes et couplage systèmes/enveloppe
- c) Mécanique des fluides numérique : application aux transferts convectifs en cavités
- d) Éclairage naturel/artificiel des ambiances de bâtiments

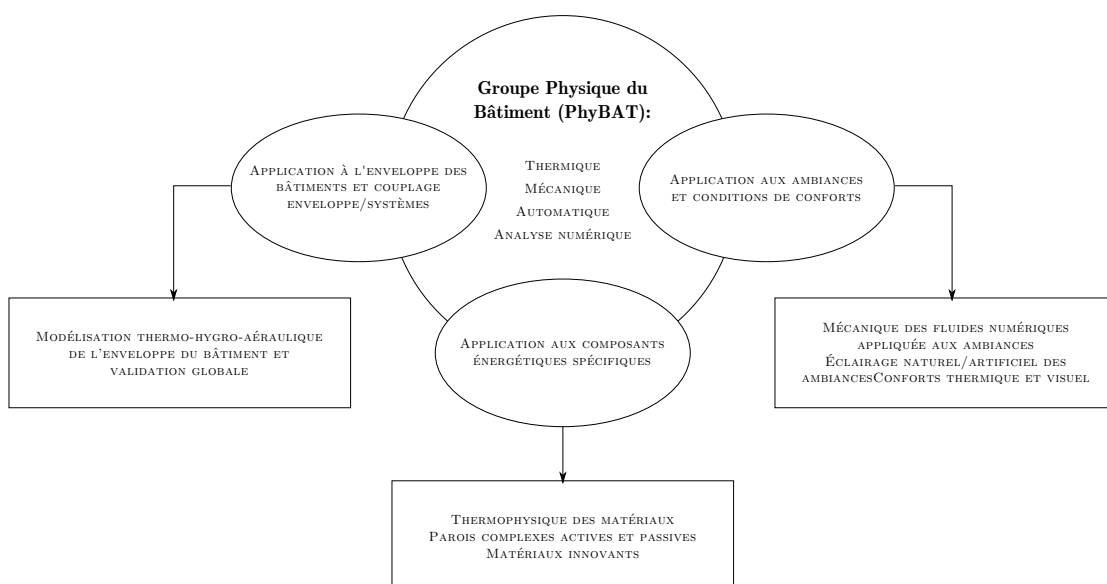
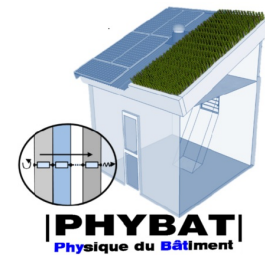


Figure 3.1 – Thématiques abordées par le groupe PhyBât

— L'approche des phénomènes physiques —

L'approche des phénomènes physiques est nécessairement corrélée au domaine d'étude. Considérant les systèmes complexes étudiés en physique du bâtiment, il est nécessaire de définir les phénomènes observés par des modèles élémentaires simples, afin de pouvoir les assembler et reproduire le comportement du système observé. La complexité provient alors de l'assemblage⁷ des modèles de base.

Ainsi, l'approche des phénomènes physiques au sein de PHYBÂT est traditionnellement de type semi-détaillé⁸. À noter que ces modèles permettent d'obtenir des prédictions ayant une erreur assez faible pour un temps de calcul bien moindre que celui des modèles déterministes.

De plus, une telle approche permet de valider expérimentalement les modèles développés *via* des indicateurs cohérents. En effet, la précision obtenue numériquement est similaire à celle issue de la chaîne d'acquisition ($\pm 1^\circ\text{C}$ [MIRANVILLE, 2002]).

Enfin, en physique du bâtiment, l'étude thermique a pour fonction de permettre la prédiction de la notion de « confort thermique » ; notion estimée par l'être humain *via* des terminaisons nerveuses spécifiques, des « capteurs » cutanés dont la précision est également de l'ordre de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Historiquement, deux codes majeurs⁹ ont été créés suivant cette approche, il s'agit de CODYRUN (écrit en langage C) et d'ISOLAB (écrit en langage Matlab). À noter que ce dernier est une plateforme de test, de développement des modèles créés avant intégration à CODYRUN.

3.4 Définition de la problématique

Considérant les divers points présentés dans les sections précédentes, la problématique retenue prend la forme des trois questions suivantes.

- Question 1 :** « *Les parois végétalisées sont-elles adaptées au climat réunionnais ?* »
- Question 2 :** « *Quelle solution technique mettre en œuvre afin d'adapter les parois végétalisées au mode constructif réunionnais ?* »
- Question 3 :** « *Comment prévoir de façon fiable et reproductible le comportement et la performance énergétique des parois végétalisées ?* »

L'approche utilisée en vue de la résolution de cette problématique est définie au cours du chapitre II.

7. À noter qu'une augmentation de la complexité des modèles élémentaires induit une complexité du modèle global bien plus importante – relation fortement non linéaire. Le développement du modèle final est alors limité par cette difficulté supplémentaire et sa validation est d'autant plus longue. En physique du bâtiment, une telle complexité du modèle final n'est pas justifiée par le gain en précision.

8. Ces erreurs sont supérieures à celles des modèles déterministes, mais communément considérées comme acceptables en physique du bâtiment vis-à-vis de l'erreur associée à la chaîne d'acquisition.

9. À noter que tous deux peuvent modéliser le champ thermique du bâtiment, la différence se fait alors concernant la méthode de définition du bâtiment, dans la vitesse de résolution et à travers l'utilisateur ciblé (seul CODYRUN est appelé à être distribué, ISOLAB étant exclusivement réservé pour la recherche).

Contexte et état de l'art

Section 4

Synthèse

Due à la révolution industrielle, le 19^e siècle fut une période charnière dans l'histoire de l'humanité. À cette époque, l'avènement des villes ouvrières provoque un défi sanitaire capital, qui est alors résolu par la mise en pratique des théories hygiénistes dont la prophylaxie est l'essence. Les décennies suivantes, l'intense industrialisation des pays du « Nord » permet peu à peu une diffusion technologique populaire et une évolution des modes de vie. Ces modifications induisent dès lors des besoins énergétiques toujours plus importants. Puisqu'accessibles et rentables, ceux-ci sont comblés par une utilisation intensive des sources d'énergies fossiles. Par définition non renouvelables, ces sources d'énergies diminuent inéluctablement, conduisant à un défi énergétique durant le 20^e siècle. Grâce au développement des technologies, de nouvelles sources d'énergies (majoritairement fossiles) purent être exploitées, résolvant ainsi partiellement le défi. Mais l'urbanisation galopante associée aux besoins énergétiques toujours croissants a ajouté un nouveau paramètre à l'équation composant le défi du 20^e siècle : l'aspect environnemental.

Source de nombreuses études scientifiques, l'impact anthropique (réchauffement climatique entre autres) a dorénavant droit de cité sur la place publique. Débattu et accepté dans de nombreux pays, il pousse dès lors une partie non négligeable de la classe politique internationale à agir. En conséquence, cette prise de conscience se répercute au niveau individuel, entre autres, par une nécessité de diminuer la consommation énergétique.

Parmi les solutions possibles, les parois végétalisées apportent partiellement une réponse à toutes les problématiques soulevées (sanitaire, énergétique et environnementale) ; elles existent pourtant depuis des millénaires, mais il reste beaucoup à comprendre et à apprendre de ces systèmes. C'est pourquoi depuis les années 1970 diverses études ont caractérisé leurs impacts thermiques, établissant des modèles afin de les prédire. Mais les PCV_H sont un sujet complexe. Ce qualificatif ayant trait aussi bien à leurs compositions qu'aux phénomènes physiques dont elles sont le siège.

Les études effectuées indiquent que la PCV_H influe notablement sur le comportement thermique de la paroi, permettant de réduire sa surchauffe ou de la refroidir selon le contexte. Cette influence semble être gouvernée par différents facteurs. Dont les principaux sont l'évolution des sollicitations (irradiation solaire, température ambiante et du ciel, vent, pluviométrie, *etc.*), l'évolution biologique des plantes (densité et couverture folliculaires, activité stomatale, *etc.*), le type de substrat (épaisseur, composition et porosité) et la teneur en eau. Toutes les études convergent sur le fait que le LAI joue un rôle important dans la réduction du flux thermique à travers la PCV_H, certains dissociant l'action du LAI sur l'isolation en fonction de la saison, positive l'été et négative l'hiver (dû à l'évapotranspiration). Par contre ces dernières ne sont pas en accord sur la caractérisation de l'influence de certains paramètres, tel que l'épaisseur du substrat.

Parmi les divers modèles créés afin de prédire le comportement thermique d'une PCV_H, tous les modèles les plus complets sont de type déterministe simplifié, *i.e.* basés sur des bilans conservatifs¹ (énergétiques et possiblement massiques). Ils sont, par définition, les modèles les plus proches de la réalité physique des phénomènes présents au sein de la PCV_H. Les principales différences, entre les modèles les plus aboutis, concernent cinq paramètres :

- r_{sc} : La résistance stomatale de la canopée ;
- r_a : La résistance aérodynamique de la canopée ;
- r_{ss} : La résistance aérodynamique de surface du substrat ;
- D_s^t : La diffusivité thermique du substrat ;
- D_s^m : La diffusivité massique du substrat.

À noter que ces paramètres sont tous exprimés *via* des modèles empiriques ou stochastiques. Ils sont donc source de développement.

Suite aux recherches bibliographiques, ainsi qu'à la définition des objectifs et de l'environnement de recherche, la problématique a pu être déterminée. Elle est constituée des trois questions suivantes :

- Question 1 : « *Les parois végétalisées sont-elles adaptées au climat réunionnais ?* »
- Question 2 : « *Quelle solution technique mettre en œuvre afin d'adapter les parois végétalisées au mode constructif réunionnais ?* »
- Question 3 : « *Comment prévoir de façon fiable et reproductible le comportement et la performance énergétique des parois végétalisées ?* »

En conclusion, les PCV_H sont des systèmes complexes, dont la prédiction du comportement est encore mal-aisée. C'est notamment le cas dans le contexte du climat tropical humide de l'île de La Réunion, où le système est à adapter aux habitudes constructives locales (toitures en tôle).

De plus, bien qu'étudiées depuis plus de 40 ans, l'absence de compréhension fine des phénomènes complexes de transferts induit une erreur quant aux prédictions du champ thermique, même par les modèles les plus performants. Ces phénomènes sont caractérisés par les cinq paramètres définis précédemment. Ils concernent principalement le flux thermique dans le substrat² (*via* D_s^t), le transfert thermique dans l'air et la canopée (*via* r_a et r_{ss}) et le transfert thermique par évapotranspiration (*via* r_a et r_{sc}).

Ces paramètres sont tous exprimés *via* des modèles empiriques ou stochastiques, donc associés aux conditions expérimentales de leurs études respectives. Mais qu'en est-il dans des conditions tropicales humides ? Ces paramètres sont-ils toujours valides ?

Dans le but de répondre à ces questions et afin de permettre la définition d'un modèle optimal³ adapté au contexte climatique de l'île de La Réunion, une étude théorique et expérimentale a été menée. Le chapitre II « Concept de parois complexes végétalisées et méthodologie » en définit le cadre.

1. Généralement moyennés, ces bilans sont effectués en surface du substrat et d'une feuille caractérisant la canopée.

2. Il s'agit de la diffusion dans le complexe [substrat + eau liquide + gaz]. La diffusion de la vapeur d'eau ($D_{s,v}^m$) peut être considérée séparément selon la finesse du modèle souhaité.

3. La notion de « modèle optimal » est assujettie à la notion de besoin sous-jacente.

Chapitre II

Concept de parois complexes végétalisées et méthodologie

*« C'est avec la logique que nous
prouvons et avec l'intuition que
nous trouvons »*

H. POINCARÉ

Sommaire du chapitre II

1	Analyse et définitions syntaxiques	57
1.1	Introduction	57
1.2	La notion de PCV	61
1.3	Une innovation : la PCV ligneuse sur lame d'air	65
2	Stratégie générale	71
2.1	Concepts méthodologiques	71
2.2	Méthodologie utilisée	72
3	Méthode et outils	75
3.1	Expérimentation	75
3.2	Modélisation	76
3.3	Validation et optimisation	76
3.4	Application	77
4	Synthèse	79

Résumé

LA problématique définie a permis le choix d'une méthodologie transversale basée sur celle traditionnellement utilisée par le groupe thématique physique du bâtiment : elle s'appuie sur un état de l'art, de l'expérimentation, de la modélisation, combinée à une phase de validation pour permettre une mise en application.

L'approche développée a permis de définir un concept simple et innovant : l'utilisation d'une liane comme sur-toiture végétale à des fins d'isolation : la $PCV_{l_{sa}}$. Ce concept fait actuellement l'objet d'un dépôt de brevet par l'Université de La Réunion. Absente de la littérature, cette solution technique est également sans dénomination et ne correspond pas à la définition traditionnelle de « toiture végétale ». Ce constat a induit la création du terme générique de « Paroi Complexe Végétalisée », source d'une nomenclature spécifique.

*« Est définie comme **paroi complexe végétalisée (PCV)**, toute paroi intégrant une couche végétale vivante, quelle que soit sa position dans le complexe ».*

Selon la méthodologie utilisée, le concept ayant été défini, il est alors possible de passer à l'étape suivante : l'expérimentation. Celle-ci fait l'objet du chapitre III.

Concept de parois complexes végétalisées et méthodologie

Section 1

Analyse et définitions syntaxiques

Suite aux recherches bibliographiques, il apparaît que les seuls termes ayant trait aux parois végétalisées horizontales définissent un type précis de composition¹. Elles sont nommées toitures vertes ou toitures végétales, des termes globaux qui définissent des compositions spécifiques². Toute autre composition ne peut prétendre à ces dénominations générales (telle que la toiture végétalisée de type ligneux). Les parois possédant de la végétation sont donc un concept sans nomenclature générique. En ce sens, la notion de Paroi Complexe Végétalisée (PCV) est proposée. Présentée au cours de l'actuelle section, cette nouvelle approche permet d'établir un cadre, une définition et une nomenclature propre à toute paroi possédant de la végétation (dont les parois hors normes).

1.1 Introduction

1.1.1 Un concept multi-millénaire

1.1.1.1 Avant le -VI^{ème} siècle

Depuis la nuit des temps, la vie se protège des prédateurs ainsi que des intempéries dans des abris naturels ou façonnés tels des carapaces, terriers, cavernes et autres abris troglodytiques. Durant le néolithique (soit entre 6 et 2,1 milliers d'années avant notre ère), les premiers hominés³ se trouvent principalement au Moyen-Orient dans une région dénommée le « croissant fertile⁴ ». Suite à la découverte du feu, puis du bronze, de petites communautés humaines se sédentarisent, développant l'agriculture (production de blé et d'orge à l'origine) et la domestication des animaux (la chèvre et le mouton, puis le bœuf et le porc). Afin de retrouver la protection ainsi que la fraîcheur des cavernes, quelques habitats troglodytiques sont excavés (ex. : Pétra, Jordanie). Mais la grande majorité des hominés de cette époque délaissent ce type d'habitat (dans la roche) et développent des pratiques constructives. Fortement liées au milieu, ces pratiques sont fonction des matériaux à disposition et du climat. Selon BOSTYN, dans la plupart des régions occupées la maison⁵ néolithique était construite en bois et torchis.

1. Le même constat est fait pour les parois végétalisées verticales (murs verts ou murs végétaux).
 2. Celles-ci sont au nombre de trois : intensive, semi-intensive et extensive (Cf. annexe C).
 3. L'état actuel des connaissances ne permet pas d'affirmer la présence d'une espèce bien définie.
 4. Nom donné par l'archéologue James Henry BREASTED de l'Université de Chicago en 1914.
 5. Au Néolithique ancien danubien, les maisons sont rectangulaires, de 45 m de long pour les plus grandes, probablement collectives, et ont un intérieur divisé par des rangées de trois poteaux destinés à soutenir le toit [BOSTYN].

Ces changements fondamentaux de mode de vie ont provoqué une expansion démographique importante. Suite à cette augmentation, ces populations d'agriculteurs-éleveurs ont progressivement colonisé le Moyen-Orient puis l'Europe⁶, à raison d'un kilomètre par an. Lors de ces lentes migrations, les pratiques et techniques constructives furent alors amenées à évoluer afin de s'adapter aux changements de milieu. , Mais les principes de protection contre les prédateurs, la surchauffe ou les déperditions thermiques furent conservés.

Certaines de ces techniques, dans des régions tempérées à froides (mais humides) consistaient à couvrir les parois d'une couche protectrice (par exemple écorce de bouleau), puis à les enduire de terre pour protéger du froid et enherber afin de maintenir cette dernière. La paroi végétalisée (intentionnellement créée par l'Homme) était née. Ce principe de construction s'est répandu⁷ dans la zone paléarctique⁸ il y a plusieurs millénaires, notamment dans les pays scandinaves, ainsi qu'en Mongolie et en Turquie. Puis, plus tardivement, chez les Amérindiens d'Amérique du Nord, où cette pratique fait toujours partie de l'habitus.

1.1.1.2 Du -VI^{ème} au X^{ème} siècle

Durant l'antiquité, au -VI^{ème} siècle, la construction est devenue un art dont l'écho a traversé les siècles. Les jardins suspendus de Babylone en sont l'illustration. Ils sont également un exemple réputé⁹ de PCV_H¹⁰ [FARRAR, 1996]. Au I^{er} siècle avant notre ère, [DIODORE de Sicile]¹¹, décrit leurs compositions comme un procédé complexe associant plusieurs couches de pierre, roseau, bitume et plomb et mis au point pour éviter que l'humidité de la terre, constituant la couche supérieure du sol des jardins, ne se répande plus bas.

Durant l'Empire Romain, les PCV_H étaient utilisées afin de rendre supportable la densité de population urbaine [FARRAR, 1996]. Des arbres étaient également installés au sommet des bâtiments institutionnels tels que les mausolées d'AUGUSTES et d'ADRIEN [PIEPER, 1987]. À Pompéi, les commerçants faisaient pousser des vignes sur leurs balcons et PLINIE écrivit à propos d'arbres importés pour des toitures végétales [JASHEMSKI et JASHEMSKI, 1993]. Les Vikings quant à eux couvraient les murs et les toits de leurs maisons avec une couche enherbée, utilisant quelques fois des algues pour isoler le toit [DONNELLY, 1992].

1.1.1.3 Du XVII^{ème} au XX^{ème} siècle

Dans un contexte plus récent, les toitures végétalisées étaient courantes dans certaines villes durant la renaissance. C'est le cas de Gênes [GEORGE, 1983], mais aussi de Mexico (pré et post-colombienne) [GOODE, 1986; FLOWER, 1937] et même du Kremlin (Russie) au 17^{ème} siècle [TITOVA, 1990]. En France, au 18^{ème} siècle des murs végétaux (PCV_V) furent construits pour leur aspect esthétique, notamment par le Prince DE CONDÉ [DELORME, 1996]. Au 20^{ème} siècle, des urbanistes tels LE CORBUSIER et Frank Lloyd WRIGHT firent un usage intensif des PCV_H. LE CORBUSIER¹² avait par ailleurs une vision des espaces urbains ayant des routes sur les toits au milieu de la végétation [CURTIS, 1994].

6. La colonisation s'est effectuée par différents courants. Ces hominins seraient arrivés sur le territoire Français actuel entre 5900 et 5500 avant notre ère [BOSTYN].

7. Ce principe est encore traditionnellement présent chez certaines des populations de la zone paléarctique. C'est le cas notamment dans les pays scandinaves.

8. Paléarctique : zone géographique correspondant essentiellement aux éco-régions terrestres de l'Europe, du nord de l'Asie, du nord de l'Afrique et du nord du Moyen-Orient.

9. N'ayant été vus que par des soldats grecs, sans aucune trace ni archéologique, ni dans les écrits babyloniens, la source de cette information est peu fiable bien que communément admise. Mais qu'il ait existé ou non, le mode de construction décrit par DIODORE de Sicile prouve que la technologie des PCV_H était déjà connue.

10. PCV_H : Paroi Complexes Végétalisées Horizontales (Cf. section 1.2.2).

11. Reprenant certainement la biographie d'Alexandre LE GRAND laissée par Clitarque D'ALEXANDRIE (autour de 300 avant notre ère).

12. En 1933, au Congrès international d'architecture moderne (CIAM) d'Athènes, LE CORBUSIER apporte une nouvelle vision de l'urbanisme. Il affirme : « Les matériaux de l'urbanisme sont le soleil, l'espace, les arbres, l'acier et le ciment armé, dans cet ordre et dans cette hiérarchie. », le docteur P. WINTER lui déclare alors : « Notre rôle et le vôtre, aujourd'hui est de restituer la nature à l'Homme, de l'y intégrer ».

1.1.1.4 Depuis le XX^{ième} siècle

— Évolution moderne des PCV_H —

Les PCV_H dites « modernes » ont évolué à partir du 20^{ième} siècle [OBERNDORFER et al., 2007]. À l'heure actuelle, les parois végétalisées « traditionnelles », donc s'apparentant aux jardins suspendus de Babylone et qui répondent aux idées de LE CORBUSIER [KÖHLER et al., 2003], sont qualifiées d'« intensives » (épaisseur de terre importante, Cf. annexe C). Elles sont principalement utilisées dans le cadre d'hôtels de luxe, de centres d'affaires ou de terrasses urbaines privées. Les besoins évoluant, la conception des PCV_H a également été modifiée. Des systèmes plus légers et moins épais, dérivés des PCV_H traditionnelles, sont apparus ; ces PCV_H sont qualifiées d'« extensives ». Il existe aujourd'hui différents types de PCV_H correspondant aux divers besoins.

Considérant les gains associés à l'usage des PCV_H, celles-ci sont de plus en plus étudiées [OBERNDORFER et al., 2007] et utilisées dans le monde [OSMUNDSON, 1999]. En ce sens, l'association de la nature à l'architecture est un courant se développant dans l'architecture contemporaine [SCHNEIDER, 2002]. Lorsque la nature a des impacts positifs sur le bâti, ce courant est appelé *Biophilic design* [KELLER, 2003]. Il peut être vu comme une tentative expérimentale afin d'obtenir une architecture écologique¹³. En ce sens, les PCV font partie des concepts promus par ce courant.

— La recherche inhérente aux PCV_H —

Avant 1970, les PCV_H représentaient une technique constructive basée sur le savoir-faire ancestral. Mais face à notre ignorance et aux incertitudes concernant les impacts de celles-ci¹⁴, notamment physiques, les PCV_H ont commencé à être étudiées scientifiquement. En ce sens, de nombreuses expériences ont été conduites en Europe depuis les années 1970 (Allemagne, Pays-Bas, Suisse, pays Scandinaves), ainsi que plus récemment aux États-Unis et au Canada. Au fur et à mesure de l'acquisition des connaissances, l'intérêt envers les PCV_H s'est accru. Ceci, car les PCV_H ont des impacts positifs sur l'esthétique, la durabilité, la biodiversité, l'environnement, la santé, l'énergie, le bien être, etc.

1.1.2 Nécessité d'une approche nouvelle

L'utilisation volontaire d'une approche générique permet d'explicitier la position du concept étudié au sein de la famille des parois végétalisées. Toutefois, elle induit la nécessité d'une approche nouvelle, d'une formulation différente de l'ensemble constitué par les parois végétalisées. Les paragraphes suivants explicitent ce besoin.

1.1.2.1 Limite des dénominations actuelles

Dans la littérature, la notion de parois végétalisées horizontale (PCV_H) peut être désignée sous différentes appellations vulgarisées. Elles sont employées selon le contexte, l'étude ou le langage utilisé. Voici certain d'entre eux : *toit vert*, *toit végétal*, *toiture végétalisée*, *toiture jardin*, *écotoit*, *terrasses végétalisées*, etc. Ces désignations impliquent toutes une conception similaire¹⁵ basée sur les couches présentées par la figure 1.1a.

Toutefois, certaines de ces dénominations définissent des détails de conception spécifiques. C'est le cas des notions de *terrasses végétalisées* et de *toitures végétalisées* qui indiquent, respective-

13. Le concept architecture écologique implique une adaptation en fonction du climat et du type de bâti, des recherches à cet effet sont donc nécessaires [KÖHLER et al., 2003].

14. L'impact des PCV_H est notamment nécessaire d'un point de vue législatif et normatif.

15. À noter que l'isolation, le drain, le géotextile et le filtre racinaires sont des éléments dont la présence est fonction du besoin inhérent à la toiture végétalisée observée.

ment, des inclinaisons¹⁶ comprises sur les intervalles $[0; 5]^\circ$ et $]5; 30]^\circ$ [PECK et CALLAGHAN, 1999].

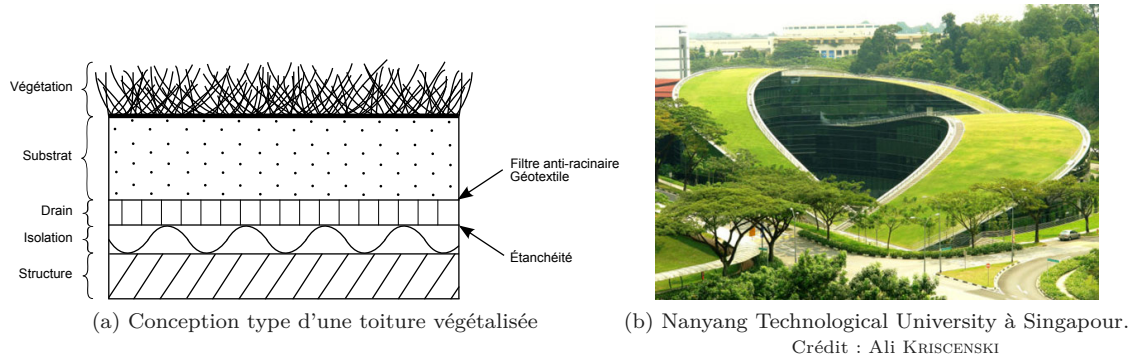


Figure 1.1 – Illustration d'une toiture végétalisée classique (PCV_{ce})

Considérant cette conception type (fig. 1.1a), seul l'angle d'inclinaison de la paroi, les épaisseurs et les types de matériaux (et plantes) sont actuellement modifiables vis-à-vis des dénominations actuelles. Par conséquent, la notion de « toiture végétale » est extrêmement restrictive. En effet, toute composition ne correspondant pas à la composition type présentée ne peut rigoureusement pas être appelée « toiture végétale ».

C'est notamment le cas d'une paroi végétalisée sans substrat ayant une végétation de type « grimpanche¹⁷ ».

1.1.2.2 Absence de classification générique

Il est établi que les parois végétalisées (toitures ou murs) sont utilisées par l'homme depuis des millénaires, toutefois leur étude est bien plus récente (XX^{ième} siècle). Selon la littérature, toutes les études portent spécifiquement sur un type de paroi précis, réduisant donc le champ d'investigation au seul système étudié (que l'approche soit expérimentale ou théorique). Il semble par ailleurs qu'une approche globale, générique¹⁸, du système dénommé par la « paroi végétalisée », n'ai jamais été nécessaire.

En ce sens, il n'existe aucune structure, aucune hiérarchie ou organisation générique définissant les liens entre les différents types parois végétalisées¹⁹ ; qui ont pourtant d'importants points communs.

Cette absence de structure, de hiérarchie ou d'organisation générique vis-à-vis des parois végétalisées induit donc des classifications tranchées, ne permettant pas de représenter la paroi végétalisée étudiée. Dans une approche générique, cette remarque induit la nécessité d'une classification adaptée. Classification définissant une convention, un cadre et une dénomination des parois végétalisées permettant de les considérer comme un ensemble, dont chacun des sous-ensemble possède des propriétés particulières.

16. Dans la littérature les inclinaisons sont exprimées en pourcentage (pente) ou en degré (angle). La conversion est $P = \tan(\alpha)$, où P est la pente (en %) et α l'angle.

17. C'est le cas de la vigne, du lierre, de la glycine *etc.*

18. Générique : donc transcendant sa composition ou son orientation.

19. Pour rappel : le terme « parois végétalisées » définit toute paroi composée de végétation vivante (dont les toitures végétales et les murs végétaux).

1.2 La notion de PCV

1.2.1 Présentation du concept

La végétalisation des parois est un procédé connu depuis plusieurs millénaires. Pourtant, comment appelle-t-on une paroi constituée d'une toiture végétalisée par une vigne courante, comme cela se pratiquait dans la Grèce antique ? À l'instar de ce système, de nombreux types de parois végétalisées ne possèdent pas de terminologie précise.

Considérant ce besoin la notion de « parois complexes végétalisées » (PCV) a été créée. Au-delà de cette fonction, cette approche générique permet de définir un ensemble dont chacun des sous-ensembles possède des propriétés particulières : {PCV}. Ce concept permet alors une classification induisant une convention, un cadre et une dénomination spécifique pour chacune des conceptions de paroi végétalisée.

Le concept de « PCV », permet donc de caractériser l'ensemble {PCV} et ses sous-ensembles contenant toutes les parois végétalisées pouvant exister. Il offre également une grande liberté de conception puisque la PCV est uniquement limitée par sa définition (non restrictive).

1.2.1.1 Définition

Suite aux besoins énoncés et dans l'optique de créer une classification généralisable à toutes les parois végétalisées, la notion de « parois complexes végétalisées » (PCV) est définie de la manière suivante :

Définition

*« Est définie comme **paroi complexe végétalisée**, toute paroi intégrant au minimum une couche végétale vivante ».*

La paroi complexe végétalisée définit toute paroi intégrant un complexe végétal. Ce dernier pouvant être présent pour des raisons écologiques [isolation thermique, biodiversité, *etc.*], sanitaires [réduction de la pollution de l'air, *etc.*], techniques [isolation phonique, *etc.*] ou tout simplement esthétiques [la nature étant essentielle au bien être de l'Homme].

Conformément à l'approche énoncée, il apparaît que cette notion est une généralisation des concepts de toitures végétales et de murs végétaux. En effet, elle ne tient pas compte du nombre ou de l'orientation des couches. Elle ne tient pas compte non plus de la présence de béton, de substrat, d'isolation ou autres lames d'air. Ces éléments sont alors indiqués par le biais de la classification mise en place (*Cf.* section 1.2.1.2).

De plus, le terme « vivant » apporte une coloration toute particulière à la notion de PCV. De fait, la paroi évolue au rythme des sollicitations externes (cycles circadiens, saisonniers, *etc.*), modifiant alors ses propriétés thermiques, hydriques, massiques, visuelles, *etc.* L'apport de cette notion justifie par conséquent à elle seule l'emploi du terme « complexe » dans l'acronyme « PCV ».

1.2.1.2 Classification de ce type de paroi

En fonction de leurs conceptions et des phénomènes présents, il est possible de classer les parois. Dans le but de cibler précisément le positionnement des PCV dans cette classification, la figure 1.2 est proposée.

Selon la hiérarchie proposée par la figure 1.2, afin de comprendre le concept de « paroi complexe végétalisée » il est nécessaire de définir au préalable les notions de « paroi simple » et de

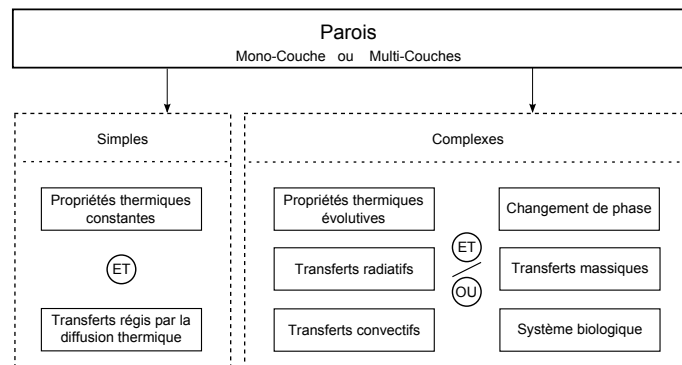


Figure 1.2 – Hiérarchie des différents types de paroi : classement en fonction des phénomènes présents en leurs seins.

« paroi complexe ». Les définitions suivantes sont basées sur celles présentées par BRETON [1986].

Définition

« D'un point de vue thermique, est défini comme **paroi simple**, toute paroi dont les propriétés thermiques des couches sont constantes et dont le transfert thermique interne est exclusivement régi par la diffusion. »

Définition

« D'un point de vue thermique, est défini comme **paroi complexe**, toute paroi intégrant une couche dont les propriétés thermiques sont non constantes ou dont le transfert thermique interne n'est pas exclusivement régi par la diffusion. »

Considérant cette définition, les possibilités de composition des parois complexes sont innombrables. En effet, leur domaine englobe les parois possédant à minima l'un des phénomènes suivant : propriétés thermiques évolutives, transferts radiatifs, transferts convectifs, transferts massiques, changement de phase ou système biologique (liste non exhaustive). Une telle paroi peut être composée de matériaux à changement de phase (MCP) [GUICHARD et al., 2014], de produits minces réfléchissants (PMR) [MIRANVILLE et al., 2003], de panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques [BIGOT et al., 2009], de lames d'air, etc.

À noter que certaines parois complexes cumulent plusieurs de ces phénomènes. C'est le cas, entre autres, du mur TROMBE-MICHEL [BOYER et al., 2011]. D'autres, particulièrement complexes, cumulent tous ces phénomènes : c'est le cas des PCV.

1.2.2 Nomenclature des PCV

La notion de PCV définie section 1.2.1.1 est volontairement extrêmement générale. Ainsi, elle n'induit aucune limite constitutive dès lors que la présence d'un complexe végétal (*i.e.* plantes vivantes) est assurée. Considérant cet aspect général, il est nécessaire de définir une classification adéquate, une nomenclature associée aux PCV permettant de les identifier aisément.

1.2.2.1 Formulation générique

La forme générique de la nomenclature est présentée par la figure 1.3. Les informations permettant de définir succinctement le type de PCV sont l'angle d'inclinaison et la composition,

respectivement indiqués en lieu et place de l'exposant α et de l'indice β .

$$\text{PCV}_{\beta}^{\alpha}$$

Figure 1.3 – Formulation générique de la nomenclature associée aux PCV

Il existe deux approches pour définir les valeurs de α et β : descriptive et typologique. La différence réside dans la précision de la description de la PCV, donc dans la compacité, la simplicité du formalisme.

1.2.2.2 Approche descriptive

L'approche descriptive consiste à définir précisément les valeurs de α (au degré près) et de β (pour les couches ayant un impact thermique).

— *L'angle : α* —

Une PCV, comme son nom l'indique, est une paroi végétalisée. L'une des caractéristiques essentielles définissant communément une paroi est son inclinaison. Cette donnée est indiquée lors de la définition de la PCV par l'exposant α (Fig. 1.3).

L'angle, défini sur \mathbb{N} , est indiqué en degré sexagésimal et s'exprime par rapport au plan horizontal. Bien que ce ne soit pas l'unité du système international, cette unité est la plus utilisée par les professionnels du bâtiment²⁰. De plus, comparativement au radian elle permet d'obtenir plus souvent des nombres entiers puisque définie sur $[0; 90]$ et non $[0; \pi/2]$.

Dans le cas d'une PCV dont l'inclinaison évolue, à l'instar de celle présentée par la figure 1.1b, la plage définissant l'angle peut être indiquée par son domaine de définition tel que $\alpha = [\alpha_{min}; \alpha_{max}]$. Par exemple, sur la figure 1.1b l'angle est estimé évoluer entre 0° et 45° , soit $\alpha \in [0; 45]$, et par conséquent la dénomination devient : $\text{PCV}_{\beta}^{[0;45]}$.

— *La composition : β* —

L'indice β quand à lui indique la composition de la PCV. La composition est définie par des mots clefs se rapportant aux couches physiques de la PCV. Ces mots clefs sont définis par la table 1.1. Le choix des mots clefs se fait d'un point de vue thermique, si la couche n'a pas ou peu d'impact thermique, alors celle-ci est négligée. Par exemple, dans le cas d'une PCV composée d'une plante grimpante sur un treillis (Fig. 1.5) la structure n'est pas prise en compte. Ceci, car le treillis a un impact négligeable sur le transfert thermique (qui est considéré perpendiculaire à la PCV). Basé sur un système modulaire, la méthode de classification descriptive est donc évolutive. Si besoin est, il suffit de définir de nouveaux mots clefs afin d'adapter cette dernière à un nouveau type de couche composant la PCV.

— *Exemples* —

Voici deux exemples de PCV définies selon la nomenclature mise en place. La première (Fig. 1.4) représente une PCV verticale composée d'une structure maintenant une couche de substrat sur lequel pousse de l'herbe ($\text{PCV}_{S_bV}^{90}$). La seconde (Fig. 1.5) représente une PCV spécifique. Il s'agit d'une pergola dont la toiture est inclinée à 25° et recouverte d'une plante grimpante ($\text{PCV}_{V_g}^{25}$).

1.2.2.3 Approche typologique

L'approche descriptive présentée précédemment permet de définir une infinité de systèmes composant une PCV. Toutefois, si le système est composé d'une multitude de couches ayant un impact thermique non négligeable, alors bien que concis, β devient trop long pour pouvoir définir

20. À terme, la classification a pour vocation d'être exportée en dehors du monde universitaire.

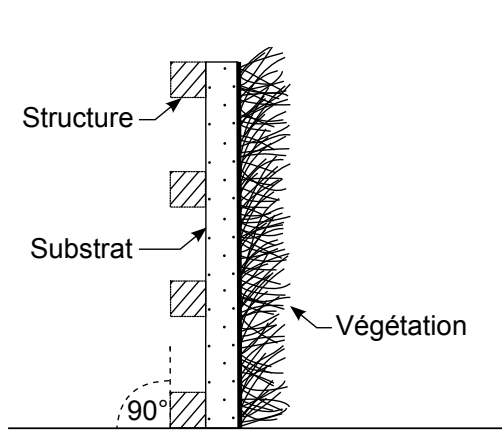


Figure 1.4 – $PCV_{SbV}^{90} \equiv PCV_V$ composée d'un treillis contenant du substrat sur lequel pousse de l'herbe.

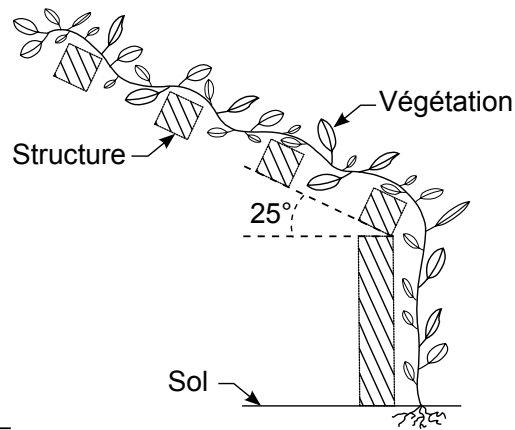


Figure 1.5 – $PCV_{Vg}^{25} \equiv$ Pergola à 25° recouverte d'une plante grimpante.

la PCV d'une manière pratique à l'usage. Afin de résoudre cet écueil et plus généralement dans l'optique de simplifier la notation, une approche typologique est définie. Elle consiste à définir des catégories de PCV en fonction de leurs types de composition.

— *L'angle : α* —

Dans le cas de l'inclinaison, il est possible de classer la PCV dans quatre catégories. Elles sont définies par la table 1.2. Les PCV possédant une continuité constitutive, les domaines de définition de chacune de ces catégories sont arbitraires. Ils proviennent des choix et considérations suivants. L'angle maximal de la toiture-terrasse (5°) constitue la pente maximale définie par le DTU 43.1 pour une PCV de type intensif. De plus, c'est également la pente à partir de laquelle le drain devient facultatif²¹ [ADIVET et al., 2007]. L'angle définissant la limite entre les toitures horizontales et verticales (30°) est communément admis dans la littérature²² [PECK et CALLAGHAN, 1999]. Elle correspond à l'angle maximal d'une toiture végétalisée extensive (vis-à-vis du maintien des couches). Enfin, la notion de « mur » est considérée comme une paroi parfaitement verticale.

Nota : par extension de la description précédente, le terme PCV_H est un cas particulier de PCV. Il désigne une « paroi complexe végétalisée horizontale » ; soit une inclinaison comprise sur le domaine $[0; 30]^\circ$. Sans contrainte quant à sa composition, cette appellation est donc une généralisation de la notion de « toiture végétalisée ». De même, le terme PCV_V ²³ désigne une « paroi complexe végétalisée verticale » dont l'inclinaison est comprise sur le domaine $[31; 90]^\circ$.

— *La composition : β* —

Dans le cas de la composition, il est possible de classer la PCV dans différentes catégories. La table 1.3 présente ces catégories. Les quatre familles de catégories définies actuellement sont les PCV de type : classique, ligneuse, hors-sol et sol naturel.

Les PCV dites « classiques » correspondent aux toitures végétales ancestrales et celles développées durant le siècle dernier ; *i.e.* : les toitures végétales intensives (PCV_{ci}), semi-intensives (PCV_{cs}) et extensives (PCV_{ce})²⁴.

Les PCV dites « ligneuses » correspondent aux parois végétalisées dont la végétation n'est pas enracinée dans la paroi. Elle est donc enracinée en dehors de celle-ci, que ce soit dans le sol, dans

21. Si le substrat ne joue pas déjà ce rôle. C'est typiquement le cas de la terre, par opposition aux scories.

22. Il n'y a toutefois pas de consensus global concernant ce paramètre. Bien que moins fréquente, une valeur également communément admise est 35°

23. Les PCV_V ne sont pas développées dans ce document. Littérature à ce sujet : [BASS et BASKARAN, 2003].

24. L'annexe C décrit succinctement ces PCV dites « classiques ».

des pots situés autour de la paroi, dans une autre paroi, *etc.* Considérant cette particularité, il s'avère que la végétation est dite ligneuse si elle a la capacité de s'étendre loin du lieu d'enracinement, tel que les plantes grimpantes, rampantes et autres lianes. Trois cas particuliers ont été définis : le cas de la végétation seule²⁵ (PCV_l), le cas où la végétation est au contact de la structure (PCV_{l_s}) et le cas où il y a une couche d'air entre la structure et la végétation ($PCV_{l_{sa}}$). Les PCV dites « sol naturel » correspondent aux PCV dont la végétation est enracinée dans un substrat naturel (amendé ou non). Deux cas ont été définis pour ce type de PCV. Ils sont fonction de la répartition du substrat, elle peut être globale sur la paroi (PCV_{sg}) ou bien localisée (PCV_{sl}). Enfin, les PCV dites « hors sol » ou hydroponiques sont identiques aux PCV de type sol naturel au détail près que le substrat est artificiel. Les cas définis sont donc similaires (PCV_{hs_g} et PCV_{hs_g})

Nota : Basée sur un système modulaire, la méthode de classification typologique est donc évolutive. Elle permet une grande flexibilité et une adaptabilité aux conceptions innovantes futures. Il suffira alors de définir de nouveaux mots clefs afin de compléter la classification.

— Exemples —

Voici deux exemples de PCV définies selon la nomenclature mise en place. La première (Fig. 1.6) représente une PCV_H classique de type semi-intensive, inclinée de 2° , et composée des couches structure, substrat et végétation. La nomenclature associée est : $PCV_{S_t S_b V}^2 \equiv PCV_{cs}^{T_e}$. La seconde (Fig. 1.7) représente une PCV spécifique. Il s'agit d'une toiture inclinée à 45° et recouverte d'une plante grimpante positionnée à 10 cm de la tôle. La nomenclature associée est : $PCV_{S_t AV_g}^{45} \equiv PCV_{L_{sa}}^{T_v}$.

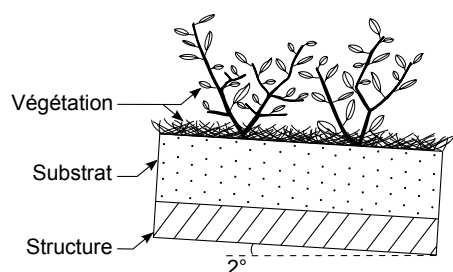


Figure 1.6 – $PCV_{S_t S_b V}^2 \equiv PCV_{cs}^{T_e} \equiv PCV_H$ classique de type semi-intensive, composée des couches structure, substrat et végétation.

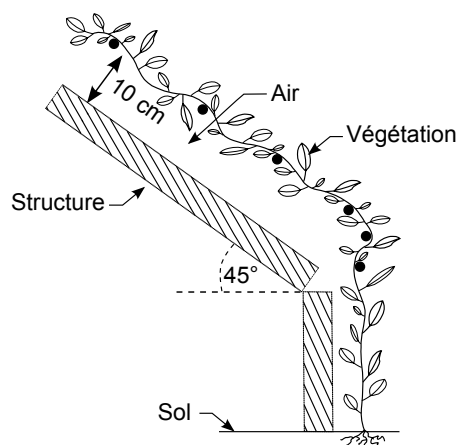


Figure 1.7 – $PCV_{S_t AV_g}^{45} \equiv PCV_{L_{sa}}^{T_v} \equiv$ Toiture à 45° recouverte d'une plante grimpante à 10 cm de la tôle.

1.3 Une innovation : la PCV ligneuse sur lame d'air

Définie durant le cheminement expérimental (*Cf.* chapitre III), cette approche constitue *in fine* la solution proposée vis-à-vis de la problématique de l'adaptation des PCV aux habitudes constructives Réunionnaises.

25. La structure étant thermiquement négligeable.

26. Les PCV classiques sont décrites dans l'annexe C.

27. Le substrat peut être réparti de manière homogène (*i.e.* : « globale ») sur toute la paroi ou bien hétérogène (*i.e.* : « locale »), alors uniquement présent pour l'enracinement, ne couvrant que de petites parties de la surface.

28. Définit les compositions basées sur toutes les espèces de plantes ayant la capacité de s'étendre loin du lieu d'enracinement, tel que les plantes grimpantes, rampantes et autres lianes.

Table 1.1 – Liste des mots clefs se rapportant aux couches physiques de la PCV

Mot Clef	Description de la couche considérée
S_t	Structure
I	Isolant
D	Drain
S_b	Substrat
A	Air
V	Végétation enracinée dans le substrat sur la paroi
V_g	Végétation grimpante (enracinée en dehors de la paroi)

Table 1.2 – Liste des mots clefs se rapportant aux inclinaisons de la PCV

Mot Clef	Description de l'inclinaison considérée
PCV_H PCV_V	T_e Terrasse $[0; 5]^\circ$
	T_h Toiture horizontale $[6; 30]^\circ$
	T_v Toiture verticale $[31; 89]^\circ$
	M Mur $[90^\circ]$

Table 1.3 – Liste des mots clefs se rapportant aux compositions typologiques de la PCV

Mot Clef	Description de la composition typologique
CI	Classique Intensive ²⁶
CS	Classique Semi-intensive
CE	Classique Extensive
S_g	Sol naturel avec répartition globale ²⁷ du substrat
S_l	Sol naturel avec répartition locale ²⁷ du substrat
HS_g	Hors Sol avec répartition globale du substrat
HS_l	Hors Sol avec répartition locale du substrat
L	Ligneuses ²⁸
L_s	Ligneuses sur structure
L_{sa}	Ligneuses sur structure et couche d'air

1.3.1 Caractérisation physique

— Description —

Les PCV ligneuses²⁹ (PCV_l) représentent un sous-ensemble du domaine des PCV dont la végétation a la propriété d'avoir la capacité de s'étendre loin du lieu d'enracinement. Les plantes grimpantes, rampantes et autres lianes constituent cette végétation. Parmi celles-ci se trouve la PCV ligneuse sur structure et lame d'air : la PCV_{lsa} , présentée par la figure 1.8.

— Phénomènes présents —

Considérant le vaste champ des possibles, toutes les PCV ne possèdent pas les mêmes phénomènes³⁰. Par exemple, le phénomène de diffusion hydrique associé au substrat est absent d'une PCV_{lsa} (*etc.*).

Dans le cas particulier de la PCV_{lsa} , les phénomènes de transferts thermiques et massiques sont présentés³¹ par la figure 1.9.

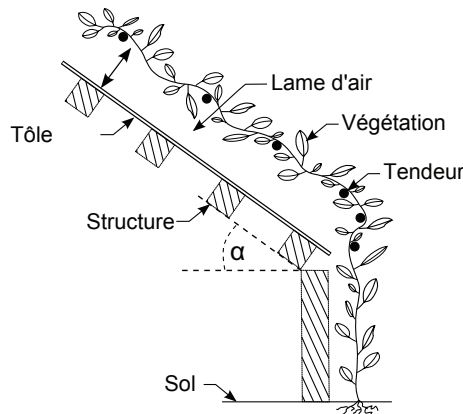


Figure 1.8 – Schéma du concept proposé.

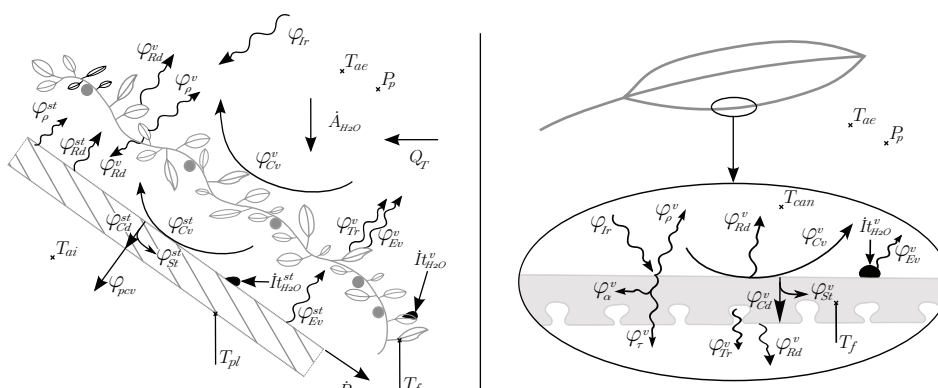


Figure 1.9 – Les phénomènes associés aux transferts thermiques et massiques présents au sein d'une PCV_{lsa} (non exhaustif).

1.3.2 Adéquation au contexte

Développée en vue de répondre à la problématique de l'adaptation des PCV aux habitudes constructives Réunionnaises, la PCV_{lsa} est actuellement la version la plus adaptée à ce contexte. En effet, vis-à-vis des toitures, les habitudes constructives sont définies par deux conceptions :

- Les structures légères : Elles possèdent une pente sur l'intervalle [6 ; 45]% (classiquement en tôle) et sont utilisées pour les centres commerciaux³², bâtiments industriels, entrepôts, ainsi que pour la très grande majorité des habitats individuels.
- Les structures lourdes : Elles possèdent une pente sur l'intervalle [0 ; 5]% (classiquement en béton) pour les immeubles, bâtiments administratifs et une petite partie des habitats

29. Les PCV ligneuses sont décrites dans l'annexe C.

30. Par contre, il est possible de présenter l'ensemble de ces phénomènes par l'intermédiaire d'une PCV les possédant tous : c'est le cas de la PCV^{T_e} . Les figures 2.9 et 2.10 de la section 2 (chapitre I) présentent ces transferts.

31. La signification des symboles est indiquée dans la nomenclature page xxvii.

32. Les PCV_{lsa} sont donc en adéquation avec le projet de loi dit « organique » adopté le 24 mars 2015 par l'Assemblée Nationale. Cf. note de bas de page n°23, section 1.

individuels.

Avec une charge pondérale faible, la $PCV_{l_{sa}}$ est donc adaptée à ces modes constructifs, quel que soit leur charge admissible et leur pente. De plus, l'étude expérimentale conclue à un impact thermique similaire³³ à celui d'une PCV_{ce} fortement irriguée.

D'après les études menées, il apparaît que la protection thermique provient de la capacité de la $PCV_{l_{sa}}$ à réduire le flux solaire atteignant la surface de la structure (tôle). À l'échelle de la feuille³⁴, sur la plage [400; 2500] nm, l'absorptance est de l'ordre de 70%, dont environ 50% est utilisé pour la photosynthèse. Le reste étant stocké dans la masse végétale, le contrôle de la température des feuilles est alors effectué *via* la transpiration, phénomène qui limite dès lors l'émission d'infrarouge³⁵ par la canopée. Associé à la protection solaire, la présence de la lame d'air ventilée sous la canopée permet d'évacuer les calories stockées dans l'air au contact de la tôle, tendant ainsi vers l'équilibre thermique, *i.e.* où $T_{tôle}$ est égale à $T_{extérieur}^{air}$ (cas idéal recherché).

Considérant l'origine radiative (issue de la photosynthèse et de la transpiration) et aérodynamique de la protection thermique, la $PCV_{l_{sa}}$ semble donc être adaptée aux conditions climatiques Réunionnaises³⁶ (*i.e.* : climat tropical soumis aux brises thermiques et aux alizés).

Concernant les risques cycloniques (vents puissants et pluies torrentielles), l'absence de substrat limite les risques de projection ou de plantes déracinées (pied de la liane protégé). Vis-à-vis de l'arrachage (vents puissants possiblement cisailant), une liane correctement accrochée perd éventuellement ses feuilles, mais conserve ses branches. Dans le cas le plus défavorable, seule la liane serait à changer alors que pour les PCV classiques il serait nécessaire de refaire toute la toiture (prix des travaux nettement supérieur). Enfin, les efforts sur la toiture durant un cyclone sont également plus prononcés avec une PCV classique, car, au-delà de la résistance aérodynamique de la canopée, l'eau stockée dans et sur le substrat tend à s'accumuler³⁷.

Pour finir, il est à noter que le choix de la plante peut être adapté en fonction du lieu d'exploitation (conditions météorologiques, biotope, *etc.*), limitant ainsi les risques d'impondérables (issu de l'acclimatation, implantation d'espèce invasive, *etc.*). Cet aspect est important à La Réunion du fait de la présence de plus de 200 micro-climats.

1.3.3 Un concept innovant

La solution technique proposée (Fig. 1.8) est une approche inspirée de lointaines pratiques de végétalisation des habitats. En effet, durant la Grèce antique les parois de certaines maisons étaient recouvertes de vigne, liant la production agricole et la protection thermique. De manière plus contemporaine, ce concept est à l'instar des vignes cultivées en « terrasses » sur les pentes de BANYULS³⁸ ou localement sur celles de CILAOS.

Cette solution est un concept innovant, car, en dépit de sa simplicité, à notre connaissance, jamais un tel système n'a été étudié. Considérant sa configuration, l'unique présence de la végétation (sous forme de sur-toiture végétale) permet d'introduire la notion de « rafraîchissement biologique³⁹ ». De plus, ce concept induit une réduction drastique de la charge pondérale, ce qui

33. Composition de la PCV_{ce} et conditions d'exploitations présentées dans le chapitre III

34. À l'échelle de la canopée l'absorptance est plus importante ceci dû à l'effet de cavité et dépend du type de plante ainsi que de la densité de superficie foliaire (LAI). Suite aux réflexions multiples, le flux non absorbé est alors transmis ou réfléchit (albédo de la PCV).

35. Selon la loi de PLANCK, tout corps émet un rayonnement électromagnétique en fonction de sa température et de son état de surface. La transpiration diminuant la température des feuilles, le rayonnement est donc minimisé. Le caractère vivant est donc un avantage important comparativement à une sur-toiture inerte.

36. L'annexe B présente succinctement le climat Réunionnais (cartes de l'ensoleillement et des précipitations).

37. L'un des points positifs (hors période cyclonique) des PCV classiques est leur capacité à déphaser les pics pluviométriques vis-à-vis des réseaux fluviaux.

38. Village situé en France, sur la méditerranée à la frontière avec l'Espagne et reconnue pour ses vins cuits.

39. Le caractère vivant de la plante induit une veille continue vis-à-vis de son état de confort, mobilisant si besoin une partie de l'énergie disponible à son refroidissement *via* la transpiration.

permet l'introduction des toitures végétalisées sur un domaine inaccessible jusqu'à présent : le parc immobilier ayant une structure bois ou métallique (en plus de l'utilisation classique sur les dalles bétons). À terme, si les conditions lui sont favorables, une telle technologie est à même de devenir un « classique » dans le paysage réunionnais. En ce sens, ce concept est innovant selon la définition du ministère de la Recherche : « *la notion d'innovation apparaît lorsque qu'un concept nouveau rencontre un besoin sur le marché* ».

Enfin, le qualificatif « innovant » est justifié par le fait qu'il n'existe aucune dénomination pour ce type de paroi. En ce sens, la notion de Paroi Complexe Végétalisée (PCV) a été établie, fixant un cadre, une définition et une nomenclature dédiés.

À noter que la PCV_{l_{sa}} fait actuellement l'objet d'un dépôt de brevet par l'Université de La Réunion.

1.3.4 Rafraîchissement biologique

Basée sur les besoins d'un être vivant, la protection apportée par la végétation sur un bâtiment est à différencier d'une simple protection solaire, elle permet un rafraîchissement de type « biologique » dont les paragraphes suivants explicitent les spécificités.

1.3.4.1 Définition

Soit la formulation suivante :

Définition

« Est défini comme **rafraîchissement biologique**, tout système vivant ayant la capacité de rafraîchir une enceinte ou une paroi par le biais d'un phénomène physique, chimique ou mécanique (ex : transpiration) en réponse aux sollicitations météorologiques. ».

1.3.4.2 Couplage bâti/végétation

Depuis des millénaires l'homme positionne des complexes végétalisés⁴⁰ sur les bâtis afin de limiter l'impact des sollicitations météorologiques. L'intérêt de ce couplage réside dans la dynamique du rythme biologique de la végétation choisie. En effet, lorsque la plante sélectionnée⁴¹ est en « phase » avec les besoins du bâti, celle-ci permet de réduire les intrants, de diminuer la température d'air locale et donc de limiter les besoins en climatisation.

1.3.4.3 Phénomènes à l'origine du rafraîchissement

D'une manière générale, le rafraîchissement biologique s'appuie sur l'une des technologies les plus avancées au monde, une technologie ayant des millénaires d'évolution : la vie. Le caractère vivant de la plante induit deux phénomènes prépondérants :

— *Protection radiative : photosynthèse et albédo* —

40. Les façades des maisons de la Grèce antique étaient fréquemment couvertes de vignes, tout comme celles du sud de l'Angleterre et du nord-ouest de la France l'étaient de lierre.

41. Il s'agit entre autres de considérer les divers types de plante, dites en « C3, C4 ou CAM » (Cf. chapitre IV section 3.3.3.3.1), mais également leurs adéquations au milieu, ainsi que la densité foliaire nécessaire (le LAI).

Le rayonnement électromagnétique reçu par la plante est principalement de type CLO et GLO. Agissant dans le spectre GLO comme un corps gris, la plus grande partie du rayonnement associé intercepté est alors absorbé et stocké thermiquement. Par contre, sur le spectre CLO une grande partie est réfléchie⁴² par les feuilles, le reste étant principalement absorbé puis stocké sous forme thermique et surtout chimique⁴³ *via* la photosynthèse⁴⁴.

— *Rafraîchissement : transpiration* —

L'absorption du rayonnement (CLO et GLO) induit une hausse de la température interne des feuilles, dépassant la température métabolique optimale. Celle-ci est alors susceptible d'être évacuée par rayonnement GLO (avec le ciel, par jour clair) ou par convection si la température d'air ambiante le permet. Toutefois, ces phénomènes ne sont pas suffisants en cas de forte température. À l'instar de l'être humain le phénomène de transpiration est alors utilisé pour pallier à cet écueil.

Possédant une veille continue vis-à-vis de son état de confort, si besoin, la plante mobilise une partie de son énergie à la gestion de l'ouverture des ostioles⁴⁵, permettant d'accentuer les échanges gazeux entre les stomates⁴⁶ et l'environnement : il y a transpiration.

42. Réflexion variant selon les espèces. Pouvant être de l'ordre de $\sim 50\%$ à l'échelle d'une feuille simple, induisant une valeur inférieure à l'échelle de la canopée (par effet de cavité).

43. Dans le cycle du carbone elle permet de synthétiser des glucides, substance nourricière de la plante.

44. Processus bioénergétique basé sur des protéines contenant des pigments photosynthétiques (ex : chlorophylle A, B, C₁, C₂, D ou F) dont l'absorption du rayonnement est principalement due à leurs doubles liaisons conjuguées.

45. Pores principalement situés en surface des feuilles (généralement en face interne) dont le taux d'ouverture est contrôlé par la plante.

46. Chambre, sous la surface de la feuille, dans laquelle s'effectue entre autres la captation du CO₂ et l'évaporation de l'eau liquide.

Concept de parois complexes végétalisées et méthodologie

Section 2

Stratégie générale

Suite à l'élaboration de la problématique et aux définitions syntaxiques, vient la question de la méthodologie à employer. Les approches sont nombreuses et dépendent des objectifs souhaités. Afin de permettre un choix, une description succincte des concepts méthodologiques est effectuée ; celle-ci favorise, dès lors, la mise en exergue de l'approche adéquate à la résolution de la problématique précitée.

2.1 Concepts méthodologiques

— *Synoptique : Recherche et résultats* —

En physique du bâtiment, les activités de recherche ont la particularité d'avoir une application directe dans la société civile¹. En effet, qu'elles soient basées sur la physique théorique ou expérimentale, lorsqu'elles sont menées à terme ces études ont toujours la capacité de s'affranchir du contexte universitaire². Elles sont alors transformées en « outils », répondant aux besoins des acteurs du secteur du bâtiment (bureaux d'études, architectes, législateur³, *etc.*).

Dans le domaine particulier de la physique du bâtiment, les étapes effectuées par le chercheur lient les recherches théoriques et/ou expérimentales aux outils proposés pour les professionnels. Considérant l'étendue du domaine des activités possibles, la compréhension des diverses étapes de la recherche nécessite alors l'explicitation du cheminement entre la problématique posée et l'obtention des résultats souhaités.

À cette fin, la figure 2.1 propose un synoptique de l'articulation des approches et des étapes durant la phase de recherche ; celles-ci permettant d'aboutir aux résultats escomptés dans le milieu universitaire ou professionnel.

— *Notion de méthode de résolution* —

D'une manière générale, lors d'un questionnement, la première étape consiste à identifier précisément la problématique. Puis, une fois celle-ci obtenue l'objectif final peut-être défini⁴. L'objectif final peut se traduire en un résultat spécifique ou en une combinaison de ces derniers qu'ils soient

1. et/ou militaire.

2. Selon la figure 2.1, il apparaît que quelle que soit l'approche utilisée (expérimentale ou théorique), les résultats associés aux recherches sont exportables vers le tissu économique. Ceci, à l'aide d'outils de simulation adaptés aux besoins des professionnels, de règles expertes ou bien de grandeurs légales.

3. Il s'agit par exemple de critères définis dans des normes et autres réglementations, tel que la résistance thermique « U » de la RT2012.

4. Dans le cas présent : favoriser l'utilisation des PCV sur le territoire réunionnais.

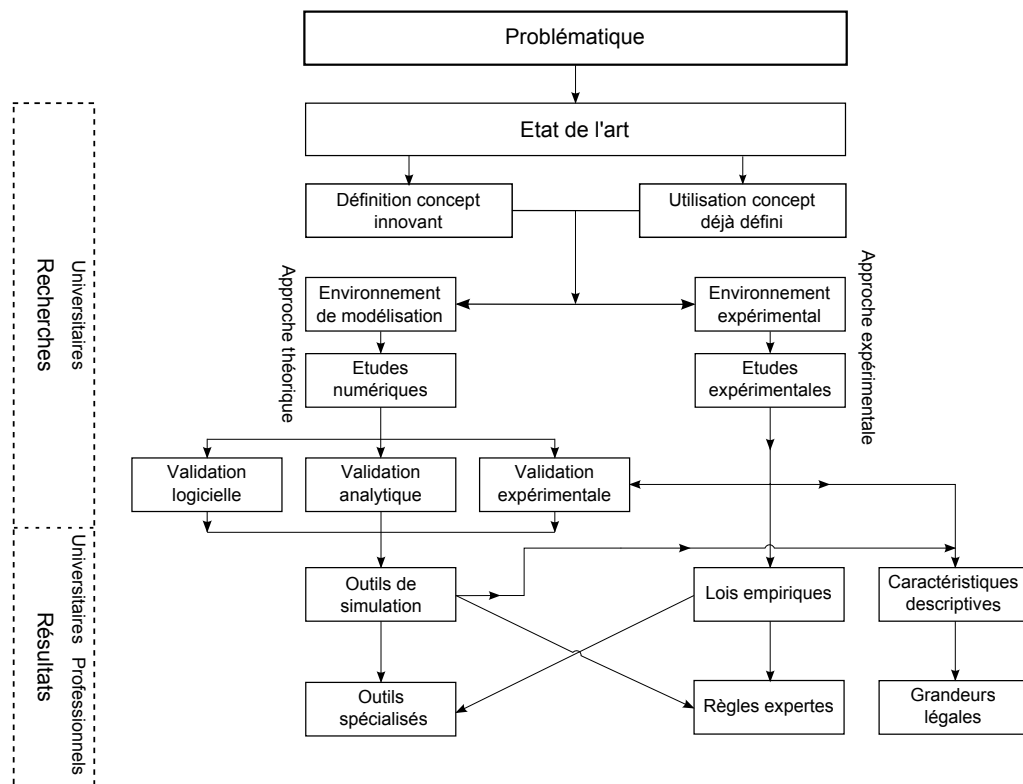


Figure 2.1 – Synoptique : Recherche et résultats

de types universitaires ou professionnels⁵ (règle experte, outil de simulation, *etc.*). Enfin, ayant obtenu le(s) type(s) de résultat(s) spécifique(s) souhaité(s) il est alors possible de déterminer la méthode de résolution adéquate et de la mettre en œuvre. Cette démarche est présentée par la figure 2.2. Il est à noter que les notions de problématique et de « type de résultats » sont présents

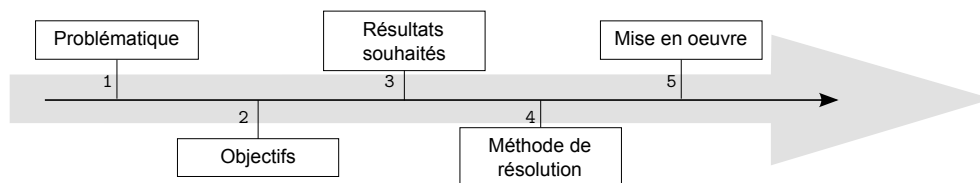


Figure 2.2 – Synoptique général de la résolution d'une problématique.

dans le synoptique de la figure 2.1. La méthode de résolution caractérise donc le cheminement choisi au sein de cet organigramme. De plus, des approches couplées peuvent également être définies. La section suivante présente spécifiquement l'une d'entre elle.

2.2 Méthodologie utilisée

Les étapes associées aux activités de recherches présentes dans la figure 2.1 induisent un choix, un parcours permettant de définir une méthode de résolution liant la problématique posée aux

5. Dans le cas présent il s'agit d'une combinaison : Obtenir les caractéristiques descriptives, ainsi qu'un outil de simulation afin de permettre l'adaptation des PCV au milieu local, et ainsi favoriser leurs utilisations *via* une règle experte.

résultats escomptés. L'équipe d'accueil ayant une méthodologie (MEVA), la méthode de résolution utilisée ($E^{21}MoVOA$) est dès lors basée sur cette dernière.

— MEV et MEVA —

Les activités de l'équipe d'accueil (PHYBÂT) se distinguent par une approche transversale et une méthodologie éprouvée : la méthode MEV⁶. Celle-ci repose sur la modélisation des phénomènes physiques validée par une confrontation expérimentale ; car comme le disait R. FEYNMAN : « *The sole test of the validity of any idea is experiment* ». Utilisée depuis des années, la méthode MEV fût récemment publiée en 2010 par [BIGOT et al., 2010]. En 2013, cette méthodologie a évolué, pour adopter un échelon supplémentaire : MEVA⁷. Dans lequel le « A » signifie *Application*. L'ajout de cet échelon traduit une double réalité au sein de PHYBÂT ; d'une part une appartenance au domaine de la physique appliquée⁸ et d'autre part une volonté de traduire les avancées scientifiques afin de les diffuser au sein du tissu économique.

6. MEV : Modélisation, Expérimentation et Validation.

7. Évolution apparue durant la thèse de S.GUICHARD suite à une proposition de B.MALET-DAMOUR.

8. Donc, *in fine*, la création d'un « objet », d'un outil spécialisé, par opposition à la physique théorique.

Concept de parois complexes végétalisées et méthodologie

Section 3

Méthode et outils

Vis-à-vis de la problématique posée, la méthodologie choisie permet donc de définir un cadre, très large, tout en donnant une direction aux travaux en vue de l'accès à une solution. L'état de l'art et le concept ayant été définis, les paragraphes suivants présentent l'approche associée aux quatre dernières étapes de la méthodologie utilisée : l'expérimentation, la modélisation, la validation (intégrant l'optimisation) et enfin le cas applicatif.

3.1 Expérimentation

3.1.1 Supports expérimentaux in-situ

Afin de tester l'impact thermique d'une PCV à La Réunion et ainsi déterminer les phénomènes les plus influents, une expérimentation a été menée. Dans le but d'obtenir ces résultats, le choix a été fait de mener l'expérimentation en environnement naturel sur des bâtiments à échelle $\frac{1}{3}$: les cellules ISOTEST. À noter que considérant l'échelle (surface de toiture d'environ $1m^2$), une étape de développement vis-à-vis des sondes d'humidité relative et des albédomètres est nécessaire. Enfin, dans le but de favoriser un export des PCV testées (ou de leurs caractéristiques) vers le tissu économique local, des conceptions innovantes ont été élaborées à l'aide notamment de plantes adaptées au climat local.

3.1.2 Méthode comparative

Puisque l'expérimentation est en environnement naturel, par définition il n'est pas possible d'en contrôler les conditions. En ce sens, quatre cellules ISOTEST sont utilisées simultanément, subissant ainsi les mêmes sollicitations, afin de tester les divers systèmes étudiés (instrumentation similaire). Cette approche a l'avantage de permettre une comparaison réaliste des différents montages et des PCV étudiées vis-à-vis des sollicitations météorologiques.

3.2 Modélisation

3.2.1 Modélisation semi-détaillée, générique et multi-modèle

Afin de modéliser une PCV un code multi-modèle a été créé : PcvBÂT. Générique et modulaire, il doit permettre de modéliser toutes les PCV imaginables. Pour ce faire, chacune des couches est décrite spécifiquement par ses caractéristiques physiques. Le choix explicite de chacun des modèles utilisés, pour chacun des phénomènes physiques de chacune des couches, en fait un code multi-modèle. La modularité en permet l'évolution, *via* l'ajout de modèles, si nécessaire, pour un phénomène physique donné.

Dans un souci de continuité avec l'approche développée par le groupe thématique PHYBÂT, le modèle créé est de type semi-détaillé est basé sur des bilans conservatifs. Résolue numérique, la discrétisation choisie pour le système obtenu est de type différences finies implicites associées à un schéma d'EULER centré d'ordre 2. Par cohérence, la précision du modèle étant adaptée à celle des mesures expérimentales, des hypothèses simplificatrices sont utilisées. Elles permettent également d'apporter une aisance d'implémentation, ainsi qu'un accroissement de la vitesse d'exécution du modèle. Il est à noter que le choix de ces hypothèses est fonction de l'erreur qu'elles engendrent.

3.2.2 Environnement et couplage à un code de simulation

L'implémentation d'un code de calcul se fait en fonction du langage de programmation. Dans le cas de PcvBÂT, les critères de ce choix portaient sur la souplesse du langage (codage rapide), ainsi que sur la reconnaissance et l'intensité de son utilisation par la communauté scientifique. L'environnement de programmation quant à lui devait permettre une visualisation des données obtenues ainsi qu'une capacité de contrôle¹ des erreurs inhérentes à la programmation (« déboguage »). Divers langages et environnements répondaient à ces critères. Dans le but de permettre une intégration rapide de PcvBÂT à ISOLAB, facilitant le couplage, le choix s'est alors porté sur le langage Matlab sous l'environnement du même nom.

Le choix de l'utilisation d'un langage interprété a par ailleurs permis de coder PcvBÂT selon une approche nouvelle, complémentaire, au sein de l'équipe d'accueil : la génération de modèle. Cette approche consiste à générer en amont de la simulation un fichier contenant exactement le modèle adapté à la modélisation souhaitée. Ainsi, seul le code nécessaire est interprété, il limite les instructions conditionnelles et par conséquent augmente la vitesse d'exécution. Cette approche permet également de vérifier aisément le code réellement exécuté, ainsi que son archivage.

Concernant le couplage, l'appel du générateur de modèle « PcvBÂT » à ISOLAB, se fait *via* l'interface de ce dernier. Il permet ainsi la définition de la PCV souhaitée. Puis, une fonction est générée automatiquement lors de la création du modèle ; elle permet l'appel spécifique du multi-modèle souhaité. Interprété à chaque pas de temps, le modèle génère et stocke dans une structure les tenseurs nécessaires. Ils sont alors récupérés par ISOLAB et couplés aux systèmes d'états thermique, hydrique et hygrique en vue de la résolution.

3.3 Validation et optimisation

Étape importante dans la création d'un modèle, la validation et l'optimisation permettent respectivement de s'assurer de la validité des données et d'affiner le modèle les générant. Pour ce faire, les outils² utilisés sont l'analyse de sensibilité paramétrique et l'optimisation paramétrique (à l'aide de l'outil GENOPT).

1. Par le biais des outils (paquets) installés.

2. L'assimilation de donnée (implémentée dans ISOLAB) est une méthode pouvant être conjointement utilisée.

3.3.1 Analyse de sensibilité

Le principe général de l'analyse de sensibilité paramétrique consiste à faire varier les paramètres du modèle étudié et à observer l'influence de chacune de ces variations sur la sortie. Il est ainsi possible de connaître les grandeurs les plus influentes du modèle considéré, qu'elles nécessitent une interaction, ou non, avec une ou plusieurs des grandeurs d'entrée. Cet outil a été implémenté³ dans ISOLAB et validé [MARA, 2000], il permet de pratiquer l'analyse sur tous les paramètres du modèle thermique de bâtiment utilisé [MIRANVILLE, 2002]. À noter qu'il a été adapté pour considérer les nombreux paramètres supplémentaires issus du modèle de PCV choisi.

3.3.2 L'outil GenOpt

Suite à l'analyse de sensibilité, les paramètres les plus influents sont déterminés *via* une optimisation paramétrique. Le principe sous-jacent à cette approche consiste à déterminer le jeu de paramètres minimisant une fonction de coût basée sur une ou plusieurs sorties du modèle. Pour cela, le logiciel GENOPT, développé par le LBNL [WETTER, 2009] est utilisé. Cet outil a été couplé avec ISOLAB [BIGOT, 2011], permettant une optimisation aisée. Ce couplage a été adapté et partiellement généralisé afin de considérer les nombreux paramètres supplémentaires issus du modèle de PCV choisi.

3.4 Application

Pour finir, un cas applicatif à la conception d'une PCV est présenté. Il permet d'effectuer une analyse comparative de manière à démontrer (pour une conception donnée) les performances énergétiques des PCV en climat tropical humide. En vue d'une telle évaluation, les paramètres significatifs observés sont la résistance thermique associée à la paroi, les économies d'énergies provoquées ainsi que l'impact de la PCV sur le confort des occupants.

Les résultats présentés permettent ainsi de donner un ordre de grandeur, par extrapolation, de l'impact possible des PCV sur le tertiaire réunionnais. De plus, l'approche utilisée favorise l'accessibilité du sujet au grand public et aux professionnels. Se faisant, elle désenclave la thématique du seul domaine universitaire.

3. L'approche utilisée dérive de la méthode FAST (Fast Fourier Amplitude Transform). Elle utilise un échantillonnage sinusoïdal des facteurs autour de leur valeur de base, chaque facteur ayant sa propre fréquence [MARA, 2000].

Concept de parois complexes végétalisées et méthodologie

Section 4

Synthèse

Afin d'apporter une réponse adéquate à la problématique, il a été nécessaire de définir une méthodologie transversale adaptée aux besoins et qui combine des activités de modélisation et d'expérimentation dans une phase de validation globale.

Cette approche permet ainsi de mener conjointement expérimentation et modélisation afin de lever les verrous présents et répondre à la problématique d'adapter les toitures végétales au contexte réunionnais, étayer le postulat actuel qu'elles ont un impact positif sur la consommation énergétique des bâtiments et enfin proposer un code de calcul permettant de prédire le comportement de telles parois.

Les PCV dites « ligneuses », et plus spécifiquement la $PCV_{l_{sa}}$, constitue le concept innovant (faisant actuellement l'objet d'un dépôt de brevet par l'Université de La Réunion). En effet, leur faible charge pondérale permet leur introduction sur un domaine inaccessible jusqu'à présent : le parc immobilier des structures légères.

Par ailleurs, le qualificatif « innovant » est justifié par l'absence d'étude d'un tel système dans la littérature, mais également par le fait qu'il n'existe, à notre connaissance, aucune dénomination pour ce type de paroi. En ce sens, la notion générique de Paroi Complexe Végétalisée (PCV) a été établie, définissant un cadre et organisant par le biais d'une nomenclature les types de parois végétales. En voici la définition :

*« Est définie comme **paroi complexe végétalisée**, toute paroi intégrant au minimum une couche végétale vivante ».*

Concernant les méthodes et outils, l'expérimentation sera faite en environnement naturel sur des bâtis à échelle réduite afin de permettre la comparaison des systèmes étudiés (dont la $PCV_{l_{sa}}$). Puis, la modélisation de la PCV sera effectuée par un modèle thermo-hygro-hydrique physique semi-détaillé, issu d'un code de calcul générique et modulaire (PCVBÂT, développé sous MATLAB). La simulation est alors permise par le couplage avec le logiciel ISOLAB. Enfin la validation expérimentale et l'optimisation seront effectuées *via* l'utilisation de l'analyse de sensibilité (méthode eFAST) et de l'optimisation paramétrique (GENOPT). Et pour finir, un cas d'étude sera présenté permettant de mettre en exergue l'utilité et les performances des PCV en climat réunionnais, principalement *via* les notions d'économie d'énergie et de confort.

L'approche (concept) et la méthode ayant été définis, les chapitres suivants fournissent les outils et les résultats permettant une prédiction précise du transfert thermique dans les PCV. Dans cette optique, il est impératif de comprendre les liens et les interactions entre les divers phénomènes caractérisant et influant sur la dynamique des transferts thermiques. Pour ce faire, une expérimentation a été mise en place, le prochain chapitre en est l'objet.

Chapitre III

Expérimentation

Chap.
III

*« The sole test of the validity of
any idea is experiment »*

R. FEYNMAN

Sommaire du chapitre III

1	Infrastructures	85
1.1	La plateforme expérimentale	85
1.2	Stations météorologiques	87
1.3	Les supports expérimentaux	88
2	Démarche Expérimentale	91
2.1	Objectifs	91
2.2	Scenarii expérimentaux	91
3	Capteurs et chaîne d'acquisition	101
3.1	Description des capteurs	101
3.2	Réglages métrologiques	106
3.3	Installation sur les supports expérimentaux	113
4	Développements spécifiques	117
4.1	Hygromètres	117
4.2	Albédomètres	124
5	Analyse des séquences Expérimentales	131
5.1	Les périodes de mesures	131
5.2	Observations sur bacs végétalisés	133
5.3	Observations sur modules ISOTEST	136
6	Exploitation des résultats	145
6.1	Introduction	145
6.2	Cinétique et répartition des flux thermiques	145
6.3	Indicateurs de performance	150
7	Synthèse	155

Approche

L'OBJECTIF de cette partie est d'obtenir à partir de l'expérimentation, dans un premier temps, le comportement thermique des PCV_H sous un climat tropical humide, puis d'adapter les PCV_H aux spécificités constructives et climatiques locales.

Plus précisément, l'expérimentation doit permettre d'obtenir les caractéristiques thermiques des PCV étudiées. De plus, elle doit également permettre de déterminer si, à La Réunion, la PCV_H peut se comporter comme une isolation thermique et/ou une pompe à chaleur.

Afin d'obtenir les informations souhaitées, dans un premier temps, la démarche expérimentale et les infrastructures utilisées sont définies. Puis, les capteurs nécessaires ainsi que les développements spécifiques à leurs utilisations sont présentés. Enfin, les séquences expérimentales obtenues sont analysées, puis exploitées afin de caractériser les comportements thermiques et de définir les indices de performance.

Section 1

Infrastructures

1.1 La plateforme expérimentale

1.1.1 Situation

La plateforme expérimentale possède une superficie de 650 m^2 positionnée sur le site de l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de l'Université de La Réunion. Localisé à aux coordonnées ($21^{\circ}34'10'' \text{ S}$, $55^{\circ}49'00'' \text{ E}$), cet emplacement est situé à une altitude de 70 m. Proche de la côte, la plateforme est soumise aux brises thermiques (venant des hauteurs en matinée et de la mer en soirée) ainsi qu'aux vents provenant de l'antarctique. Cette position, associée au relief et à l'insularité, induit un microclimat particulier défini en moyenne par une humidité conséquente, un fort ensoleillement et des épisodes de vents¹ fréquents (donc présence d'embruns salins). La cinétique des principaux indicateurs climatiques relevés sur la plate-forme expérimentale est présentée par la figure B.1. Les moyennes associées à ces derniers sont explicitées dans le tableau 1.1.

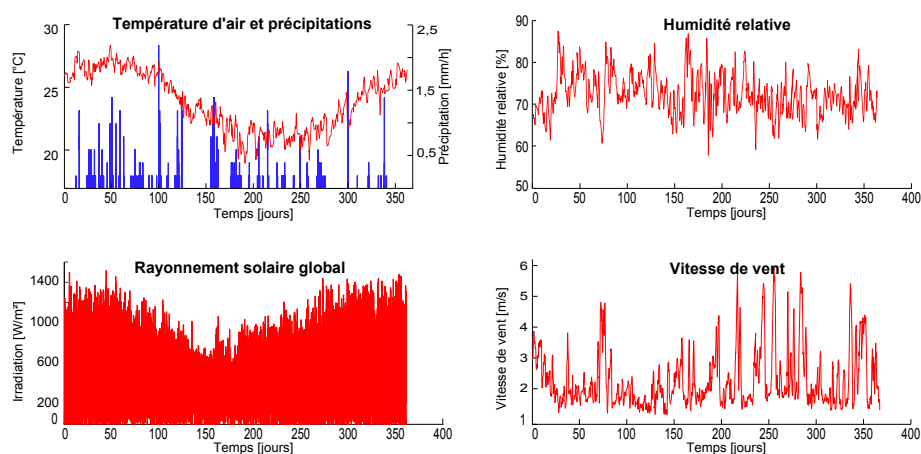


Figure 1.1 – Sollicitations météorologiques du 1er janvier au 31 décembre 2011.

1. Même en dehors de la saison cyclonique.

Table 1.1 – Moyennes des sollicitations météorologiques pour l'année 2011

Grandeur	Température d'air (°C)	Humidité relative (%)	Rayonnement global ² ($W.m^{-2}$)	Pluviométrie (mm cumulés)	Vitesse de Vent (10m) ($m.s^{-1}$)
Été austral	25,6	70,1	307.0	45,79	2,84
Hiver austral	22,4	71,7	223.9	0,25	2,49

1.1.2 Description

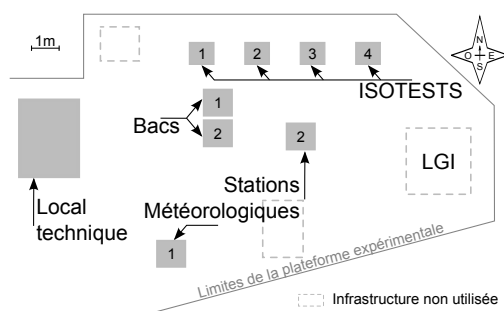
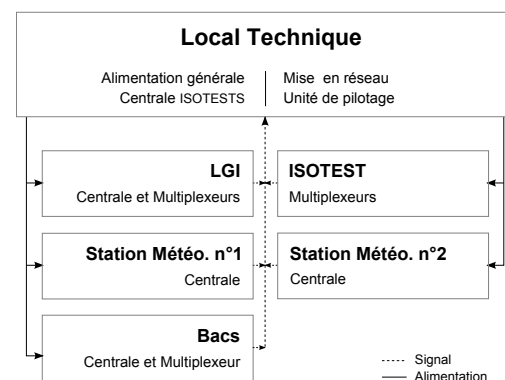
— Conception —

La plateforme expérimentale en environnement naturel a été conçue dès 1999, selon un cahier des charges spécifique basé sur (1) l'influence de l'environnement (sollicitations humaines et naturelles), (2) la capacité de caractérisation des performances thermiques d'un composant de toiture, (3) l'automatisation des campagnes de mesure (à court et long terme) et enfin (4) l'optimisation des coûts [MIRANVILLE, 2002]. L'originalité de celle-ci, mis à part le climat, est principalement basée sur l'association de supports expérimentaux allant de l'échelle réduite avec les cellules ISOTEST à l'échelle unité avec la cellule LGI³. L'implantation et la description fonctionnelle sont présentées dans les paragraphes ci-dessous. À noter que les infrastructures sont orientées en direction du nord géographique afin de maximiser les sollicitations solaires⁴.

— Implantation et description fonctionnelle —

La figure 1.2 définit le plan d'implantation des infrastructures utilisées présentes sur la plateforme expérimentale.

La figure 1.3, définit quant à elle la description fonctionnelle associée aux infrastructures utilisées présentes sur la plateforme expérimentale, *i.e.* le synoptique des chaînes d'acquisitions.

**Figure 1.2** – Plan d'implantation des infrastructures utilisées**Figure 1.3** – Synoptique des chaînes d'acquisition associées aux infrastructures utilisées

2. La moyenne est effectuée sur 24 heures, donc tenant compte du jour et de la nuit.

3. La cellule LGI correspond à une cellule ISOTEST à échelle 1 (3 m de côté). N'étant pas utilisée au court de cette thèse elle n'est pas présentée ici. Cette infrastructure est amplement détaillée dans les thèses de MIRANVILLE [2002] et GUICHARD [2013].

4. Dans l'hémisphère sud, la direction du nord est celle possédant l'irradiation maximale (à l'instar la direction du sud dans l'hémisphère nord).

1.2 Stations météorologiques

Les stations météorologiques situées sur le site ont pour fonction la mesure des grandeurs caractérisant les sollicitations météorologiques. Récoltées au pas de temps de la minute, ces données sont nécessaires aux simulations effectuées avec le modèle développé (et de manière générale avec ISOLAB ou tout autre code prédictif en thermique des bâtiments).

Parmi les valeurs utilisées lors de la simulation, les grandeurs relevées par les stations météorologiques sont classiquement :

- la température sèche de l'air (T_{ae}) ;
 - l'humidité de l'air extérieur (HR) ;
 - l'irradiation diffuse⁵ (E_D), et globale (E_G) ;
 - la hauteur d'eau précipitée ;
 - la vitesse et direction (W_s , W_d) du vent
 - la pression atmosphérique.
- [2;10] m ;

Selon Météo France, la qualité des données récoltées est fonction du site d'exploité. Ceux-ci sont classés *via* une échelle allant de 1 à 5, basée principalement sur l'environnement présent autour du point de mesure. Les niveaux indiquent alors la précaution à prendre quant à l'utilisation des données acquises (1 étant le cas idéal, ne nécessitant pas de vérification). Suivant cette classification, le site utilisé a été classé de niveau 3 par Météo France, donc nécessitant une vérification des données (principalement concernant le vent et l'irradiation). À noter que les capteurs utilisés sont positionnés selon le standard préconisé par la WMO (organisation mondiale de métrologie). De plus, les données issues de la station⁶ dite « fixe » sont contractuellement exploitées par Météo France.



Figure 1.4 – Les deux stations météorologiques : « fixe » et « portable »

Les données obtenues sont compilées et stockées dans un fichier qualifié de « fichier météo ». La compilation se faisant à la volée, une ligne est ajoutée à chaque pas de temps ; les grandeurs relevées sont donc stockées sous forme de colonnes (pas de temps croissant).

Dans le but de simplifier et d'automatiser l'acquisition des données, celle-ci est faite en ligne *via* un serveur protégé. Toutefois, si besoin, il est possible d'accéder directement aux centrales ou à l'unité de pilotage du système se trouvant dans le local technique.

Une fois acquis, le fichier météo doit être traité. À noter que la nécessité de cette étape est récente, elle provient de l'évolution des centrales de mesure CAMPBELL SCIENTIFIC, sur lesquelles a été basée la définition spécifique des fichiers météorologiques nécessaires à ISOLAB. Un extrait de ce type de fichier météorologique est présenté par le tableau 1.2.

Table 1.2 – Extrait d'un fichier de données météorologiques du 3 Septembre 2012.

Jour	Heure [hhmm]	T_{ae} [°C]	E_D [W.m ⁻²]	E_d [W.m ⁻²]	E_G [W.m ⁻²]	W_s [m.s ⁻¹]	W_d [°]	HR [%]
247	1215	25,35	775,14	89,21	864,35	1,52	116,95	60,87
247	1230	25,35	792,53	108,87	901,41	1,49	116,95	56,65
247	1245	25,90	790,29	122,71	913,00	1,38	116,95	50,91
247	1300	26,10	784,77	115,16	899,83	1,43	123,98	48,21

6. Ce n'est pas le cas pour la station dite « portable » car celle-ci est vouée à être déplacée.

6. La moyenne est effectuée sur 24h, donc tenant compte du jour et de la nuit.

1.2.1 La station fixe

La station météorologique dite « fixe » est représentée par l'occurrence n°1 sur le schéma d'implantation (fig. 1.2). Correspondant au standard selon Météo-France, elle est composée d'un mât de 10 mètres (fig. 1.4) et possède (entre autres) les sondes nécessaires aux mesures des grandeurs suivantes : Irradiation diffuse, irradiation globale, température sèche d'air, humidité relative, pression atmosphérique, précipitations ainsi que vitesse et direction du vent (à 2 et 10 m).

L'acquisition est effectuée *via* une centrale de type CR3000 (CAMPBELL SCIENTIFIC) positionnée dans un boîtier étanche sur le mât. Cette dernière est reliée au local technique par une gaine enterrée permettant de fournir l'alimentation nécessaire⁷ et de récolter les données enregistrées. Cette infrastructure est gérée et entretenue par le laboratoire, fait l'objet d'une veille. Elle n'est donc pas à étalonner.

1.2.2 La station portable

La station météorologique dite « portable » correspond à l'occurrence n°2 sur le schéma d'implantation (fig. 1.2). Elle est composée d'un mât de 2 mètres (fig. 1.4) et possède (entre autres) les sondes nécessaires aux mesures des grandeurs suivantes : Irradiation globale, température sèche d'air, humidité relative, pression atmosphérique, précipitations ainsi que vitesse et direction du vent à 2 m.

L'acquisition est effectuée *via* une centrale de type CR800 (CAMPBELL SCIENTIFIC) positionnée dans un boîtier étanche sur le mât. Cette dernière est reliée au local technique par une gaine enterrée permettant de fournir l'alimentation nécessaire et de récolter les données enregistrées. À noter que cette station a la capacité d'être autonome en énergie si besoin puisque possédant également un kit solaire (panneau et batterie).

L'installation de cette infrastructure date de 2011. Considérant l'âge des capteurs, la vérification des valeurs obtenues est faite par comparaison avec la station météorologique n°1.

Enfin, l'intérêt d'une seconde station sur un emplacement aussi restreint provient de la nécessité d'avoir des données assez précises pour caractériser les phénomènes présents sur les infrastructures instrumentées. En effet, il s'avère que la faible distance, séparant la station n°1 des cellules ISOTEST, est suffisante pour impacter de manière non négligeable les champs thermiques simulés [BIGOT, 2011].

1.3 Les supports expérimentaux

1.3.1 Les supports dédiés à la PCV : les bacs végétalisés

Les bacs végétalisés sont au nombre de deux, ils permettent de tester une configuration de PCV. Conçu en polyéthylène (3 mm), chaque bac possède une surface d'un mètre carré et un volume de $0,15 \text{ m}^3$. Les dimensions sont définies par la figure 1.5.

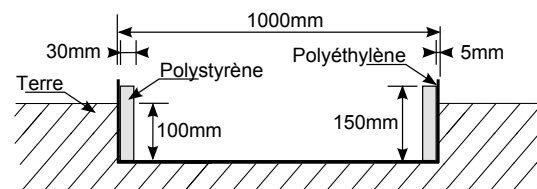


Figure 1.5 – Descriptif structurel du bac

Les bacs ayant été introduits sur le site pour les besoins de l'expérimentation il a été nécessaire de définir leurs localisations. Pour ce faire, le choix a été effectué en s'inspirant de la démarche et du cahier des charges évoqués précédemment concernant la plateforme expérimentale (sec. 1.1.2).

7. Un panneau photovoltaïque relié à une batterie est présent afin d'assurer le bon fonctionnement en cas de coupure électrique sur le réseau.

À noter qu'une contrainte supplémentaire a été ajoutée : que les bacs doivent être à proximité des cellules ISOTEST afin d'être soumis à des sollicitations similaires et ainsi permettre une comparaison des données acquises. Situés près de l'ISOTEST n°1, leurs positions sont présentées par la figure 1.2. Comme indiqué précédemment, les bacs végétalisés hébergent le scénario n°1 : l'étude portant sur la PCV²_{S_tS_bV}. La configuration choisie et la position des capteurs seront présentées section 3.3 et illustrées par la figure 3.14.

Table 1.3 – Constitution inhérente aux bacs végétalisés.

	Bac 1 PCV ² _{S_tS_bV}	Bac 2 Témoin « substrat »
Constitution	<ul style="list-style-type: none"> – Terre +∞ – Scories 100 mm – Terreau 45 mm – Végétation 50 mm (<i>zoysia tenuifolia</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> – Terre +∞ – Scories 100 mm

1.3.2 Les supports dédiés au couplage PCV-enveloppe : les modules ISOTEST

Les cellules ISOTEST sont des cellules monozones à échelle 1/3. Elles sont au nombre de quatre et forment un banc d'essai en conditions naturelles. Étant toutes identiques initialement, elles ont pour fonction de tester des composants de toiture afin de déterminer leurs caractéristiques thermo-physiques ainsi que leurs performances comparatives.

Isolées (murs et sol) et hermétiquement scellées, les dimensions et compositions de la cellule ISOTEST sont présentées par la figure 1.6 (volume intérieur d'environ 0,36 m³). Compte tenu de la démarche expérimentale présentée précédemment, chacune des ISOTEST est affectée d'une toiture spécifique, celles-ci ont été décrites dans la section 2 ; Elles sont présentées par les figures 5.10 et 5.11. De plus, afin de simplifier la dénomination de ces différentes configurations, celles-ci ont été référencées par le biais de nombres cardinaux. Allant de un à quatre, ceux-ci sont visibles sur le plan d'implantation des infrastructures utilisées (fig. 1.2). Enfin, la composition de chacune des configurations choisies est reportée dans le tableau 1.4. La configuration choisie et la position des capteurs seront présentées section 3.3 et illustré par la figure 3.17.

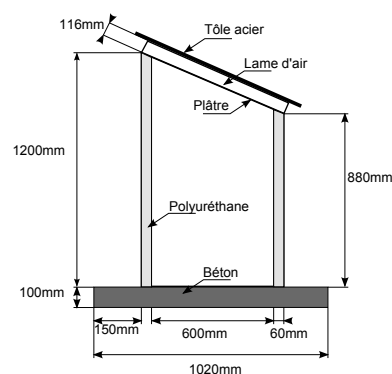


Figure 1.6 – Descriptif structurel de base de l'ISOTEST

Table 1.4 – Constitution des cellules ISOTEST selon les configurations choisies.

Partie	Enceinte	Toitures			
	ISOTEST 1 à 4	ISOTEST 1 Témoin « substrat »	ISOTEST 2 PCV ²⁴ _{S_tS_bV}	ISOTEST 3 Témoin « tôle »	ISOTEST 4 PCV ²⁴ _{S_tAV_g}
Constitution	Parois : – Tôle acier 1 mm – Polyuréthane 60 mm – Tôle acier 1 mm Sol : béton 100 mm	– Plâtre 8 mm – lame d'air 116 mm – Tôle acier 1 mm – Scories 80 mm	– Plâtre 8 mm – lame d'air 116 mm – Tôle acier 1 mm – Scories 80 mm – Terreau 45 mm – Végétation 50 mm (<i>zoysia tenuifolia</i>)	– Plâtre 8 mm – lame d'air 116 mm – Tôle acier 1 mm	– Plâtre 8 mm – lame d'air 116 mm – Tôle acier 1 mm – lame d'air 50 mm – Végétation 200 mm (<i>Tristellateia Australasiae</i>)

Section 2

Démarche Expérimentale

2.1 Objectifs

Selon la problématique définie dans le chapitre précédent, les objectifs de l'expérimentation consistent à :

1. Déterminer si l'utilisation d'une PCV classique (PCV_{ce}^{Te}) est adaptée au climat réunionnais ;
2. Adapter (et tester) l'usage des PCV aux spécificités constructives et climatiques locales.

Ils ont pour but d'augmenter l'état des connaissances relatives aux PCV en vue de permettre leurs développements sur le territoire réunionnais.

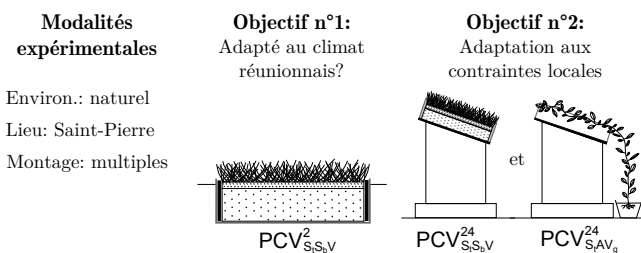
Il s'avère, selon la littérature, que le caractère isolant apporté par une PCV diffère selon le climat [LIU et BASKARAN, 2004]. Plus précisément, en climat tropical humide (Hong Kong), JIM et TSANG [2011a] indiquent une forte diminution de la surchauffe du bâti en saison chaude, mais également un accroissement des déperditions en saison froide conduisant à une surconsommation énergétique (chauffage). Au-delà de la caractérisation thermique des PCV mises en œuvres, l'étude actuelle doit alors permettre de déterminer si un tel comportement est observable à La Réunion.

2.2 Scénarii expérimentaux

Dans l'optique de pouvoir déterminer l'impact d'une PCV_H , la première étape a été de choisir les modalités de l'expérimentation. Considérant les objectifs, celles-ci doivent se dérouler en milieu naturel dans un environnement dédié. À cette fin, le site de l'IUT de l'Université de La Réunion, localisé à Saint-Pierre de La Réunion, a été sélectionné.

La seconde étape a été de déterminer le type de composition testée. Afin de répondre à l'objectif n°1, la composition de la PCV_H doit être « classique ». Pour cette raison, le premier montage est une PCV_{ce}^{Te} ; par ailleurs, cette composition permet également une comparaison avec les données présentes dans la littérature. Enfin, pour l'objectif n°2, les montages proposés expérimentent des solutions dites « non classiques » (PCV_{ce}^{Th} et PCV_{La}^{Th}) dont le but est d'adapter les PCV_H aux contraintes locales. À noter que chacune d'entre elles s'accompagne d'une toiture dite « témoin », utilisée comme référence.

Les trois cas d'études composant les scénarii expérimentaux sont présentés dans les sous-sections suivantes.



2.2.1 Cas classique : Toit terrasse ($PCV_{ce}^{T_e}$)

La PCV étudiée est une $PCV_{ce}^{T_e}$ ou plus exactement une $PCV_{S_t S_b V}^2$, c'est donc une toiture-terrasse « classique » avec une pente moyenne de 2° dont les couches structure, substrat et végétation sont définies dans les paragraphes suivants. La notion de toiture témoin est également définie. Les schémas associés à cette étude sont présentés sur la figure 2.1.

— Structure —

Classiquement, les $PCV_{ce}^{T_e}$ sont établies sur des toitures-terrasses dont la structure est une dalle en béton. Il aurait été idéal de pouvoir se positionner dans un tel cas, c'est-à-dire pouvoir instrumenter 20 m^2 de toiture minimum dont la moitié serait végétalisée¹. Or aucune surface de ce type n'était disponible sur, ou à proximité, du site expérimental². Par ailleurs, s'agissant d'études préliminaires il n'était pas envisageable de construire un bâtiment à cette fin. Par conséquent, nous avons opté pour une approche à échelle réduite³, sur la base de supports existants; la surface étudiée est alors de l'ordre du mètre carré, ce qui permet, en première approche, d'estimer l'impact de la PCV.

L'objectif étant de mesurer l'évolution des températures au sein de la PCV, il est impératif qu'un gradient de température soit présent entre les faces inférieure et supérieure. Ceci implique trois configurations possibles : une structure « ouverte » portant la toiture à environ 1 mètre du sol (avec libre circulation de l'air sous la toiture), la même conception, mais avec une structure close et troisièmement une toiture posée à même le sol. Considérant l'aspect préliminaire de l'étude, le troisième cas a été choisi.

Toutefois, la notion d'échelle réduite soulève une problématique : la faible surface induit le risque d'un effet de bords. En effet, bien que le substrat soit isolé des bords, il est probable que le transfert thermique à leur proximité puisse affecter la température du fond de la structure. Deux actions sont alors menées afin de limiter cet impact : premièrement, le complexe de toiture est enterré (la surface du substrat est positionnée au niveau de la terre), deuxièmement la structure en béton est supprimée au profit d'un bac en polyéthylène de 5 mm d'épaisseur. Dans cette approche, l'inertie du béton est ainsi remplacée par celle (approximée infinie) de la terre au contact du bac. Aux vues des sollicitations, suivant cette configuration, la terre agit dès lors comme une source froide, un puits de chaleur, induisant possiblement la présence d'un important flux thermique négatif en face interne de la PCV (ϕ). L'objectif de l'utilisation des PCV étant de limiter la surchauffe, cette approche permet d'observer le comportement de la PCV dans un cas très défavorable vis-à-vis du flux incident (ϕ sur la figure 2.1), et donc de définir si les PCV peuvent être adaptées à La Réunion.

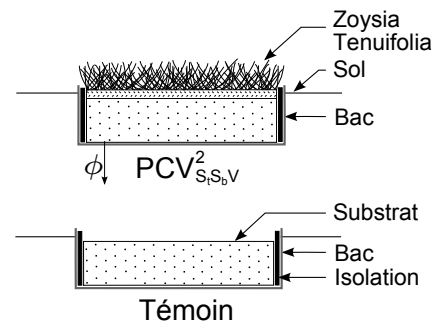


Figure 2.1 – Schémas du cas classique.

— Substrat —

Il ressort de la littérature que le substrat utilisé est fortement lié aux considérations structurelles et botaniques du système implanté. La porosité doit donc être adaptée aux besoins en rétention d'eau (roche volcanique, argile expansée, *etc.*). À noter que le substrat peut être composé de matériaux organiques (écorces, terreau, *etc.*) et/ou inorganiques⁴ (possiblement

1. La seconde moitié servant de surface témoin permettant d'obtenir l'impact de la PCV comparativement à une toiture « classique ».

2. Ce site a l'avantage d'être déjà instrumenté concernant les phénomènes météorologiques, données nécessaires pour l'étude des PCV.

3. Nota : La notion de réduction d'échelle s'applique uniquement vis-à-vis de la superficie, les épaisseurs des couches constituant la PCV ne sont pas impactées.

4. Dans le cas d'un substrat totalement inorganique, les nutriments sont alors apportés *via* l'irrigation.

synthétiques). Le plus souvent, une combinaison de ces types est effectuée afin d'obtenir les propriétés physiques souhaitées. L'équation 2.1 formalise cette combinaison, où M.O. et M.I.P. indiquent respectivement Matière Organique et Matière Inorganique Poreuse.

$$\text{Composition} = X\% \text{ Sable} + Y\% \text{ M.O.} + Z\% \text{ M.I.P.} \quad (2.1)$$

Les proportions étant fonction du type de PCV et de végétaux implantés, les toitures végétalisées de type extensif sont classiquement pourvues d'un substrat de faible épaisseur (entre 4 et 15 cm généralement). Elles sont principalement composées de matière inorganique poreuse (pour le poids et la rétention d'eau). Considérant ceci, notre choix s'est porté sur un substrat de 10 cm d'épaisseur composé de scories (matériau local) et de 15% de matières organiques⁵. Cette répartition est en conformité avec la composition classiquement utilisée pour les PCV_{ce}.

Enfin, l'un des avantages du scorie est sa forte propension à drainer l'eau. Ce drain naturel permet ainsi le respect de la réglementation en vigueur, puisque selon les règles constructives françaises un drain est impératif pour une pente inférieure à 5° [ADIVET et al., 2007]. De plus, ce choix permet également d'éviter l'ajout d'un système de drainage spécifique, simplifiant ainsi la modélisation associée.

— Végétation —

Les végétations associées à une toiture végétale de type extensif (donc PCV_{ce}^{T_e}) sont des plantes nécessitant un faible enracinement. Ce sont classiquement des plantes « grasses » (généralement de la famille des *sédum*) ou bien des herbacées. Considérant ces deux types de plantes, leur vitesse de pousse, leur taux de couverture, leur adéquation au climat local, notre choix s'est porté sur un herbacé : le *zoysia tenuifolia* également appelé « gazon des Mascareignes ».

Comme son nom l'indique, cette plante est adaptée aux contraintes climatiques de l'île de La Réunion (principalement sécheresse et embruns salins). Mais au-delà du caractère local de cette espèce, ce choix a été effectué, car elle possède une grande homogénéité spatiale et temporelle⁶ (propriétés idéales pour la modélisation future). Le conditionnement se faisant par plaques⁷ (positionnées sur 45 mm de terreau), le taux de couverture est de 100% dès la fin de la pose. De plus, le gazon bien irrigué est la référence dans les modèles d'évapotranspiration issus de PENMAN-MONTEITH recommandés par le programme FAO⁸, de l'ONU. Ce type de végétation permettra donc de limiter partiellement les écueils liés à la modélisation de ce phénomène. Enfin, cette végétation a été utilisée par JIM et HE [2010]⁹ à Hong Kong (climat tropical humide) en 2010. Il devrait dès lors être possible de corroborer les résultats obtenus¹⁰.



Figure 2.2 – *Zoysia Tenuifolia*

— Instrumentation spécifique —

Le présent paragraphe définit succinctement les grandeurs acquises lors de cette étude. Les grandeurs nécessaires à cette étude (hors sollicitations météorologiques) sont de types hydriques et thermiques. Il s'agit plus précisément du champ de température dans la PCV, du flux thermique la traversant et de la teneur en eau dans le substrat.

Considérant l'épaisseur du substrat et la précision souhaitée, une seule sonde est positionnée

5. Pourcentages issus de l'expertise de la société EVE, partenaire d'EcoVÉGÉTAL, spécialiste des toitures végétalisées à La Réunion.

6. Pousse très lente, de l'ordre de quelques centimètres par an avant d'atteindre sa taille optimale (≈ 100 mm).

7. Semé au préalable, le gazon est prélevé par plaques de $1 \times 0,5$ m². La couche racines/terre mesure 30 mm.

8. « Food and Agriculture Organization ». Programme de l'ONU pour l'alimentation et l'agriculture.

9. JIM est actuellement l'une des références majeures concernant les PCV_H en climat tropical humide.

10. L'annexe J présente l'article traitant de ce sujet.

afin d'obtenir une teneur en eau moyenne. Le flux thermique est quant à lui relevé en face interne de la PCV, donc entre le substrat et la paroi du bac.

Enfin, pour le champ thermique, en vue de valider le modèle, il est nécessaire de positionner une colonne de capteurs au centre du bac dont trois se situent dans le substrat et deux dans la végétation (racine et feuilles). À noter que lors de l'étalonnage, un capteur de température excentré est spécifiquement positionné afin de vérifier l'intensité des effets de bords. Les positions précises sont visibles sur la figure 2.3.

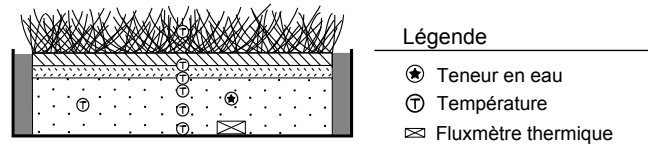


Figure 2.3 – Instrumentation de la PCV^{T_{ce}}

— Témoin —

La raison d'être de la surface témoin (ou surface de référence) est d'obtenir l'évolution des champs thermiques et hydriques pour une conception traditionnelle de toiture, ici une toiture terrasse. Ainsi, l'instrumentation de cette dernière permet une comparaison avec des champs thermiques et hydriques issus de la toiture expérimentée. Ceci, dans le but de caractériser la PCV en terme de réduction/gain du flux thermique traversant la paroi, et donc en terme de consommation énergétique (climatisation/chauffage) associée.

La toiture-terrasse est classiquement composée d'une structure béton, d'une couverture bitumineuse pour l'étanchéité et d'une couche de gravier¹¹ (10 à 20 cm) de faible granulométrie. Étant donné l'approche utilisée pour la structure, le béton est remplacé par le polyéthylène, rendant la couverture bitumineuse non nécessaire. De plus, cette dernière n'est pas présente dans le bac végétalisé donc elle doit également être absente du bac de référence. Enfin, la couche de gravier est remplacée par une couche de scorie de 10 cm d'épaisseur. Ainsi seul le complexe terreau+végétation diffère entre le bac végétalisé et le bac de référence. Ce dernier a donc la capacité de simuler une toiture-terrasse et de permettre de déterminer l'impact de la couche végétale¹² (ici la plaque de gazon installée) sur le flux thermique traversant la paroi.

2.2.2 Cas classique adapté : Installation sur tôle en pente (PCV^{T_h})

Le second cas d'étude est une adaptation au contexte réunionnais de la toiture-terrasse précédente (PCV^{T_{ce}}). L'approche développée, bien que considérée dans les règles constructives [ADIVET et al., 2007], est à notre connaissance inexistante de la littérature scientifique.

Les paragraphes suivants ont donc pour objectif de présenter le contexte ainsi que les adaptations effectuées. À noter que celles-ci ont trait uniquement à la structure puisque le substrat et la végétation sont similaires à l'expérimentation de la PCV^{T_{ce}} ; Ils correspondent à 80 mm de scorie, 45 mm de terreau et au gazon des Mascareignes (*zoysia tenuifolia*). Enfin, une attention particulière est apportée aux toitures témoins. Les schémas et dimensions associés à cette étude sont présentés par la figure 2.4.

Remarque : aux vues des problèmes mécaniques, en l'état, cette configuration n'a pas vocation à être installée chez les particuliers. Elle a été mise en œuvre afin d'observer son comportement thermique et permettre une comparaison possible avec les autres complexes de toiture testés.

— Contexte —

Il existe à La Réunion une spécificité architecturale dénommée « case créole¹³ ». Ce type de bâtis se caractérise par une construction de plain-pied, généralement en bloc béton et possédant

11. Afin de protéger thermiquement, mais surtout du poinçonnement et des rayons ultra-violets qui délitent cette dernière. Granulométrie variant généralement entre 1 et 4 cm.

12. L'impact de la couche végétale est obtenu par post-traitement suite à la suppression de l'impact du terreau.

13. Architecture issue des traditions constructives des travailleurs de la canne à sucre il y a plus de 200 ans.

une toiture en tôle d'acier¹⁴ dont la pente évolue généralement entre 15° et 40°. Dans ce contexte, la PCV étudiée est alors une PCV_{ce}^{Th} ou plus exactement une $PCV_{S_i S_b V}^{24}$. Autrement dit, c'est donc une toiture ayant une pente moyenne de 24° composée des couches structure, substrat et végétation.

— Structure —

Dans l'optique d'une expérimentation à échelle réduite (afin de permettre une comparaison directe avec l'expérience précédente), la $PCV_{S_i S_b V}^{24}$ possède une superficie de l'ordre du mètre carré. De plus, celle-ci doit être positionnée sur un support représentant une case créole. Afin de répondre à ces contraintes, la $PCV_{S_i S_b V}^{24}$ est établie sur un module ISOTEST. Défini dans la section 1.3.2, le module ISOTEST est un module à l'échelle 1/3 d'une enceinte monozone possédant une structure légère et une toiture en tôle. Cette approche, permet d'obtenir l'impact direct de la toiture sélectionnée, dans des conditions standardisées.

Structurellement, puisqu'issue de l'adaptation de la toiture-terrasse sur une case créole, la structure de la $PCV_{S_i S_b V}^{24}$ est composée d'une tôle d'acier¹⁵. Par extrapolation, cette conception est en accord avec les règles constructives en vigueur [ADIVET et al., 2007]. Considérant le substrat et la pente de 24°, il est alors nécessaire de concevoir un cadre permettant le maintien des couches supérieures composant la PCV. Celui-ci est fait en bois pour des raisons relatives à la mise en œuvre, mais surtout à la conductivité thermique du matériau. En effet, les planches de 22 mm d'épaisseur permettent de limiter les effets de bords, principalement ceux issus des sollicitations solaires de courte longueur d'onde (CLO).

Il est à noter que contrairement à l'expérimentation précédente, il n'existe pas de bac en polyéthylène contenant le substrat et la végétation. De plus, le cadre en bois, construit en lieu et place du bac, induit un phénomène absent de cette dernière : le percolat. En effet, l'eau traversant le scorie est évacuée et non stockée. Ce choix constructif permet de drainer¹⁶ l'eau, limitant ainsi le poids de la structure lors des épisodes pluviométriques.

Pour finir, une attention particulière est apportée au substrat, le choix du scorie permet de réduire considérablement la charge pondérale. Ceci intrinsèquement et *via* les épisodes pluviométriques. En effet, la masse volumique¹⁷ apparente à sec (739 kg.m^{-3}) limite la charge permanente et la forte perméabilité ($\geq 1 \text{ m.s}^{-1}$) associée à une faible rétention d'eau (masse volumique apparente à saturation 878 kg.m^{-3}) permet de limiter la charge d'exploitation.

Ce système¹⁸ associé à la végétation sélectionnée permet dès lors d'obtenir une charge permanente de l'ordre de 104 daN.m^{-2} . Cette charge représentant une contrainte pouvant être prévue lors de la conception du bâtiment.

— Instrumentation spécifique —

Le présent paragraphe définit succinctement les grandeurs acquises lors de cette étude. Le choix des capteurs associés est explicité ultérieurement (section 1.3.2).

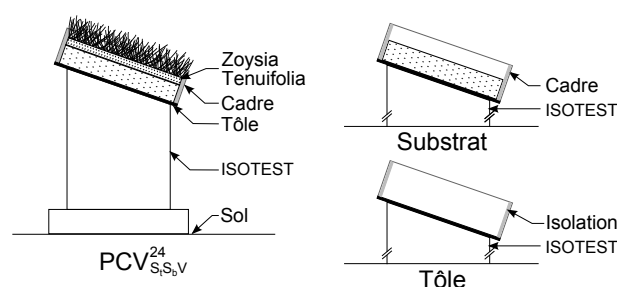


Figure 2.4 – Schémas du cas classique adapté.

14. Les tôles sont souvent soudées sur une structure métallique, sécurité nécessaire vis-à-vis des cyclones.

15. Toutes les cellules ISOTEST possèdent une tôle de couleur bleue, dont les extrémités sont peintes en blanc si besoin afin de limiter les effets de bord (fig. 5.10).

16. La présence d'un drain est facultative si la pente de la toiture est supérieure à 5° [ADIVET et al., 2007].

17. Le substrat sélectionné (scorie et par la suite terreau) ont fait l'objet d'une étude particulière afin d'obtenir la masse volumique intrinsèque et apparente (sèche et saturée), ainsi que la perméabilité.

18. Calcul pour la composition testée (saturés) : 80 mm de scories, 40 mm de terreau et la plaque de gazon.

Comme pour l'étude précédente, les grandeurs nécessaires à cette étude (hors sollicitations météorologiques) sont de types hydriques et thermiques. Il s'agit plus précisément du champ de température dans la PCV, du flux thermique la traversant, de l'albédo de la canopée, de l'humidité relative dans la canopée et de la teneur en eau dans le substrat.

Considérant l'épaisseur du substrat et la précision souhaitée, une seule sonde est positionnée afin d'obtenir une teneur en eau moyenne. Selon la même approche, une unique sonde est positionnée à la surface du gazon afin d'obtenir l'humidité relative en surface¹⁹ de la canopée²⁰, cette grandeur étant utile pour l'obtention du flux thermique évapo-transpiré (*via* le ratio de BOWEN) et afin de valider le modèle associé.

Vis-à-vis de l'albédo, la sonde²⁰

mesurant cette grandeur est positionnée²¹ au-dessus de la canopée.

Le flux thermique est quant à lui relevé en face interne de la PCV, donc entre le substrat et la tôle en acier, mais également entre le substrat et le terreau dans lequel pousse le gazon. Enfin, pour le

champ thermique, en vue de valider le modèle, il est nécessaire de positionner une colonne de capteurs. Elle est localisée au centre de la toiture afin de limiter les effets de bords. La disposition des capteurs se fait ainsi : trois se situent dans le substrat, un à l'interface substrat terreau, un à l'interface terreau plaque de gazon, trois dans la végétation (racines air canopée et surface) et enfin un dans l'air au dessus de la canopée. Les positions précises sont visibles sur la figure 2.5.

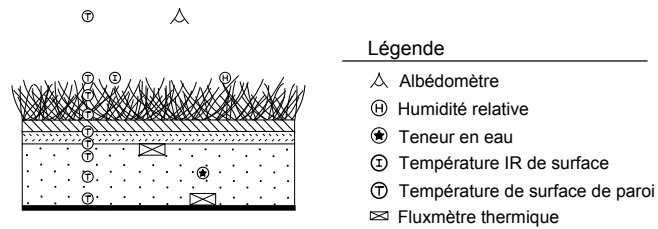


Figure 2.5 – Instrumentation de la PCV^{T_h}_{ce}

— Témoins —

Dans le cas de la PCV²⁴_{S_tS_vV} la toiture témoin est nécessairement positionnée sur le support ISOTEST, toutefois elle peut être définie de deux façons :

1. Être composée uniquement de la structure : la tôle en acier. Ainsi, les données obtenues permettront de comparer l'impact de la présence de la PCV définie. Cet impact permettant de répondre en partie à la problématique initiale : quel est l'impact thermique d'une PCV_H dans le contexte réunionnais.
2. Être composée de la structure et du substrat. Ainsi, les données obtenues permettront d'obtenir l'impact de la présence de la végétation comparativement au substrat seul. Cet impact est utile pour la validation ultérieure des modèles associés à la couche végétale.

Ces deux approches possèdent des qualités nécessaires à la résolution de la problématique. Par conséquent, elles sont toutes les deux choisies. Le scénario n°2 possède donc deux toitures témoins, dénommées respectivement « tôle » et « substrat ».

2.2.3 Cas innovant : PCV ligneuse sur tôle (PCV^{T_h}_{L_{sa}})

Le troisième cas d'étude est une adaptation innovante des PCV_H au contexte réunionnais : la PCV^{T_h}_{L_{sa}}, ou plus précisément PCV²⁴_{S_tAV_g}. Elle a été développée suite au cas d'étude n°2, si bien que ce dernier est en réalité une étape entre les cas n°1 et n°3. Autrement dit, le cas d'étude présenté ici est l'aboutissement des réflexions initiées en vue d'adapter les PCV_H au contexte Réunionnais.

Inspirée des premières pratiques de végétalisation des habitats et de pratiques locales l'approche développée ici induit une réduction drastique de la charge pondérale, principale lacune des parois complexes végétalisées (dont celles développées précédemment). En dépit de sa surprenante simplicité, ce concept innovant est à notre connaissance inexistant de la littérature

19. Idéalement une sonde aurait dû être positionnée dans la canopée : impossible celle-ci est trop fine.

20. Capteur associé a fait l'objet d'un développement particulier afin de l'adapter aux besoins (section 4).

21. Position ayant fait l'objet d'une optimisation, définie section 4.

scientifique. À noter que la notion de concept innovant associée à cette approche a été développée dans le chapitre précédent, section 1.3.3.

Les paragraphes suivants ont donc pour objectifs de présenter l'analyse menant au concept développé, ainsi que les adaptations effectuées. Enfin, comme pour les études précédentes, une attention particulière est apportée à la toiture témoin. Les schémas associés à cette étude sont présentés par la figure 2.8.

— Analyse —

Bien que réduite au maximum (composition, faible épaisseur) la charge pondérale des PCV étudiées représente malgré tout une contrainte importante pour le bâti. À noter que cet aspect nécessite généralement une adaptation structurelle et *in fine* des surcoûts pouvant limiter l'usage des PCV. Considérant ceci, une réflexion particulière a donc été menée en vue de réduire les charges associées à l'usage d'une PCV et ainsi permettre une installation sur toute structure légère (acier, bois, *etc.*).

La principale origine de la contrainte associée aux PCV_H étudiées est due au substrat, intrinsèquement (*via* son poids propre), et *via* la teneur en eau (perméabilité et rétention). Or, selon la littérature le substrat est présent pour diverses raisons :

- l'enracinement de la végétation (support physique et nourricier) ;
- l'impact thermique ;
- l'impact hydrique (rétention d'eau, déphasage du percolat) ;
- l'impact phonique (isolation), *etc.*

Liste à laquelle peut se rajouter l'impact de la contrainte normale associée à la PCV, puisque dans une certaine mesure l'augmentation du poids permet d'assurer la stabilité du bâti dans les épisodes extrêmes (tremblement de terre et autres cyclones).

Considérant l'objectif de cette étude, il s'avère que notre priorité se résume à l'impact thermique. Celui-ci possède les quatre effets suivants :

1. Réduction de l'effet d'îlot urbain

Il s'avère que l'effet d'îlot urbain provient du flux thermique (*via* l'émission ou la réflexion) issu des surfaces composant la ville. Dans le cas d'une couverture végétale à 100%, la diminution de cet effet provient donc de la faible température de surface de la canopée ainsi que sa faible réflectivité.

2. Inertie thermique

L'inertie thermique induit un déphasage et une atténuation du flux thermique traversant la PCV. Elle est utile vis-à-vis du confort thermique, principalement dans le cas de températures d'air extérieur ayant une forte variabilité jour/nuit. Dans le cas contraire, et si la température d'air circadienne moyenne le permet, le déphasage peut s'avérer non nécessaire. Dans ce cas, le flux thermique est principalement d'ordre radiatif (CLO et GLO) ; l'atténuation peut être effectuée *via* la seule canopée si le taux de couverture est suffisant.

3. Résistance thermique

La résistance thermique d'une PCV évolue en fonction de sa composition et des sollicitations climatiques *via* sa teneur en eau (sous forme liquide, solide ou gazeuse). Vis-à-vis de la résistance thermique, le substrat joue un rôle de limitant quant aux transferts thermiques et massiques. Notamment concernant les transferts convectifs. Par contre, la capacité de rétention d'eau du substrat induit le phénomène d'évaporation, source d'augmentation des transferts thermiques (pertes).

À noter que dans le cas d'une canopée possédant un taux de couverture de 100% (ayant une faible transmittance) et assez épaisse pour limiter les transferts convectifs et radiatifs, le substrat peut s'avérer non nécessaire.

4. Réduction de l'intensité du champ thermique

L'évaporation interne et en surface (due à l'adduction) induit une réduction de l'intensité du champ thermique. Ce phénomène est qualifiable d'avantage et/ou d'inconvénient en fonction des conditions météorologiques. Cet aspect correspond aux remarques faites par

JIM et TSANG [2011a] en climat tropical humide, évoquées dans la section 2.1. Dans les conditions climatiques adéquates, la suppression du substrat permettrait de limiter l'évaporation et donc les effets de pompe à chaleur indésirables (sans corrélation avec les besoins en transferts thermiques).

À noter que la végétation étant conservée, le phénomène de transpiration est, lui, toujours présent. Ce dernier est assimilable à un phénomène d'évaporation qui serait contrôlé par la plante. Plus exactement, le contrôle du volume de vapeur d'eau libéré est basé sur la température interne des feuilles (besoins en rafraîchissement). La transpiration est donc fonction des sollicitations (irradiation et convection). Autrement dit, ce phénomène a pour impact de réduire la température de la canopée, mais uniquement lorsque la plante en ressent le besoin. À l'échelle de la PCV, la transpiration induit donc un impact prépondérant : la réduction des gains thermiques pour le bâti.

Par conséquent, vis-à-vis de l'impact thermique, le substrat peut être supprimé de la composition d'une PCV. Afin de conserver les avantages de cette couche, trois conditions doivent être remplies²² : il est nécessaire d'observer une température d'air ayant une faible variabilité jour/nuit et une moyenne circadienne²⁴ adéquate, accompagnée d'un taux de couverture de 100% pour la canopée (faible transmittivité). À noter que ces conditions sont accessibles en climat tropical humide.

Cette conclusion permet dès lors l'ouverture du domaine des PCV à une tout autre dimension : celle des PCV ligneuses²⁵. En ce sens, dans le cadre de notre étude, il a été choisi de remplacer la couche de substrat par une lame d'air (ventilée), permettant ainsi l'évacuation des calories stockées par la tôle et par l'air au contact de celle-ci. Le système sélectionné est donc une PCV_{Lsa}^{Th} ou plus exactement une PCV_{StAVg}^{24} .

— Structure —

À l'instar de l'étude sur la PCV_{StSbV}^{24} (afin de permettre une comparaison directe), la PCV_{StAVg}^{24} est également positionnée sur un support ISOTEST. Se faisant, la toiture est à échelle réduite et possède une superficie de l'ordre du mètre carré. Enfin, puisque qu'issue de l'adaptation pour une case créole, la structure de la PCV_{StAVg}^{24} est composée d'une tôle d'acier.

— Végétation —

La végétation étant composée d'une liane, il est nécessaire de concevoir un support afin que celle-ci puisse se développer à la distance souhaitée²⁶ de la structure (tôle). Pour ce faire, des montants en bois sont positionnés de part et d'autre de la toiture (le long de la pente). Leur unique fonction est de permettre l'installation de câbles tendus (fil doux de faible tension), servant de supports au développement de la végétation²⁷ (figure 2.8).

Par définition de la PCV choisie, la liane est enracinée en dehors de la toiture. Plus spécifiquement, elle tire ses forces de la terre amendée et irriguée (auto-



Figure 2.6 – *Tristellateia Australasiae*

22. Dans le cas contraire, une isolation localisée sous la tôle²³ permettra de compenser cette lacune et de réduire ainsi le flux thermique traversant la PCV.

23. L'isolation pouvant prendre diverses formes allant de la simple lame d'air non ventilée aux PMR, en passant par les isolants classiques (laine de roche, polystyrène) et autres lièges et ouate de cellulose, *et caetera*.

24. Moyenne permettant une situation de confort dans le bâti (climatisation/chauffage non nécessaire).

25. Notion définie section 1.3.1.

26. Considérant l'irradiation CLO de l'ordre de 1100 W.m^{-2} (12h TSV) et la réflectivité de la tôle, des précautions peuvent être nécessaires afin de ne pas endommager la plante si le taux de couverture n'atteint pas 100%.

27. Une attention particulière doit être apportée vis-à-vis de l'impact cyclonique sur le système mis en place.

matiquement) présente dans un pot positionné au pied de l'ISOTEST²⁸.

Considérant le nombre de lianes présentes sur le territoire, le choix de la liane à utiliser est basé sur les conseils d'un horticulteur local. Les paramètres retenus furent :

- présence locale et adaptation aux conditions climatiques de l'île ;
- couverture totale de la surface ;
- peu ou pas d'entretien ;
- pas de fruits (attire les insectes et encombrant les gouttières) ;
- pousse rapide ;
- constance du taux de couverture ;
- si possible esthétique.

À partir de ces paramètres, le choix s'est porté rapidement en faveur de la *Tristellateia Australasiae* (fig. 2.6) également appelée « étoile d'Australie » ou « douche d'or ». Ayant un développement rapide et vigoureux, cette plante grimpante peut atteindre 3 à 6 m de haut. De plus, elle se distingue par sa constance : la canopée est toujours verte (malgré la sécheresse) et parsemée de tons jaunes (floraison quasi-continue). Enfin, elle possède l'avantage de ne pas attirer les parasites.

— Instrumentation spécifique —

Le présent paragraphe définit succinctement les grandeurs acquises lors de cette étude. Le choix des capteurs associés est explicité ultérieurement (section 1.3.2).

Comme au scénario précédent, les grandeurs nécessaires à cette étude (hors sollicitations météorologiques) sont de types hydriques et thermiques. Il s'agit plus précisément du champ de température dans la PCV, du flux thermique la traversant, de l'albédo de la canopée et de l'humidité relative dans la canopée.

Considérant l'épaisseur de la canopée, deux sondes sont positionnées verticalement afin d'obtenir une mesure de l'humidité relative sous et dans la canopée²⁹. La sonde²⁹ mesurant l'albédo est naturellement positionnée³⁰ au-dessus de la canopée. Le flux thermique est quant à lui relevé en face interne de la PCV, donc sous la tôle en acier. Enfin, pour le champ thermique, en vue de valider le modèle, cinq capteurs sont répartis verticalement, entre la surface de la tôle en acier et l'air au-dessus de la canopée. Les positions précises sont visibles sur la figure 2.7.

— Témoin —

Tout comme dans le cas de la PCV²⁴_{S_tS_bV}, la toiture témoin associée à la PCV²⁴_{S_tAV_g} est nécessairement positionnée sur le support ISOTEST. Considérant la composition de la PCV²⁴_{S_tAV_g} elle ne peut être définie que d'une seule façon : être composée uniquement de la structure³¹ (la tôle en acier). Ainsi, les données obtenues permettront de comparer l'impact de la présence de la PCV définie sur une toiture réunionnaise standard.

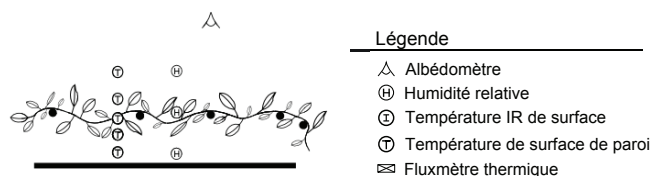


Figure 2.7 – Instrumentation de la PCV²⁴_{S_tAV_g}

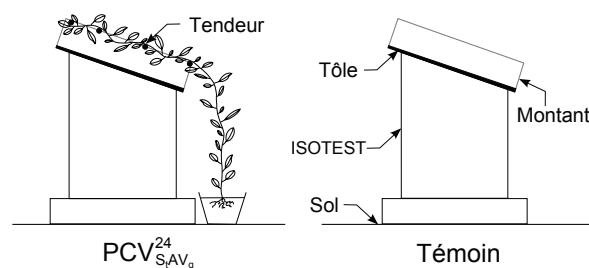


Figure 2.8 – Schémas du cas innovant.

28. Pots visibles sur la figure 5.15 de la section 5.3.3.

29. Capteur associé à fait l'objet d'un développement particulier afin de l'adapter aux besoins (section 4).

30. Position ayant fait l'objet d'une optimisation, définie section 4.

31. À noter que les supports en bois créés pour positionner les tendeurs sont également présents afin que les sollicitations s'appliquent de manière similaire sur les deux montages (à l'absence de végétation près).

Section 3

Capteurs et chaîne d'acquisition

3.1 Description des capteurs

La mise en place des capteurs est un point important de la conception de la chaîne d'acquisition, car potentiellement source d'erreurs aléatoires, mais surtout systématiques (les plus difficiles à repérer). Les paragraphes ci-dessous en détaillent les caractéristiques ainsi que la mise en œuvre.

À noter que des capteurs présentés sont utilisés de manière identique dans toutes les expériences, raison pour laquelle la description est faite selon une approche générale.

3.1.1 Transferts énergétiques

3.1.1.1 Température de surface de paroi

Considérant la plage de température observée ($[10^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}]$), ainsi que la précision communément admise par les modèles en thermique du bâtiment ($\pm 1^{\circ}\text{C}$), le choix des capteurs de température est celui classiquement utilisé en physique du bâtiment : le thermocouple¹ de type T (cuivre/constantan). Ce capteur passif possède une erreur intrinsèque de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, $\pm 1^{\circ}\text{C}$ si l'on considère la chaîne d'acquisition [MIRANVILLE, 2002].

Concernant la mise en œuvre, les thermocouples au contact d'une paroi sont recouverts d'adhésifs ultra-fins permettant de maintenir le contact entre ces derniers. De plus, l'adhésif est peint aux couleurs de la paroi², afin de reproduire les conditions de surface de la paroi. Enfin, de la pâte thermoconductrice est utilisée afin de favoriser le transfert de chaleur³.

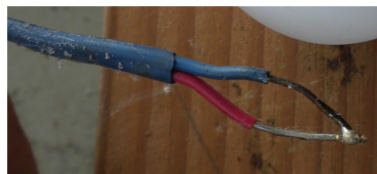


Figure 3.1 – Cliché d'un thermocouple type T installé en toiture.

3.1.1.2 Température radiante moyenne

La température radiante moyenne (ou température de globe noir) est mesurée par le biais d'un thermocouple de type T. La spécificité de cette mesure réside dans la protection du thermocouple : une sphère creuse peinte en noir ; celle-ci a pour fonction de maximiser les échanges radiatifs et limiter les échanges avec la température de l'air. Uniquement présents dans les cellules ISOTEST, ces capteurs sont de



Figure 3.2 – Cliché d'un globe noir en toiture.

1. La tension délivrée est proportionnelle au gradient de température observé (effet SEEBECK).
2. Blanc pour les ISOTEST et noir pour les bacs végétalisés.
3. Conductivité augmentée d'un facteur ~ 30 pour une pâte thermique « classique » à base de silicone ($\lambda_{\text{air}} = 0,026 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$ et $\lambda_{\text{pâte}} \approx 0,8 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$).

diamètres 15 cm et 3 cm, respectivement dans l'enceinte et dans la lame d'air.

— Interne —

La température sèche d'air dans les ISOTEST est mesurée par le biais d'un thermocouple de type T. Tout comme pour la température radiante moyenne, la spécificité de cette mesure réside dans la protection du thermocouple. Dans ce cas, il est nécessaire de protéger le thermocouple des phénomènes radiatifs (GLO). Pour ce faire, un cylindre en aluminium est utilisé, il mesure 6 cm de diamètre pour 15 cm de longueur et est positionné verticalement.

— Externe —

La température sèche d'air externe est, elle aussi, mesurée par le biais d'un thermocouple de type T. À l'instar de leurs homologues en interne, il est nécessaire de les protéger des phénomènes radiatifs (bien plus intenses en extérieur dû au rayonnement CLO). Ceci est permis par l'utilisation d'adhésif ultra-fin ayant une forte réflectivité.

De plus, ces thermocouples étant en surface de toiture (dans l'air ou bien dans la canopée), ces derniers nécessitent un support afin d'être maintenus à la position voulue. Pour ce faire, le « peigne thermique » (disposition en colonne) est créé *via* l'utilisation d'un tube en PVC de diamètre 20 mm. Système visible sur la figure 5.10 .

3.1.1.3 Température de surface de végétation

Associée à un organisme vivant, la température de surface de végétation ne peut pas être obtenue par une mesure de contact à long terme. Ceci, car la présence du capteur induit un stress pour la plante risquant de modifier son comportement (la transpiration notamment, siège d'un important transfert thermique). De plus, le contact est nécessairement imparfait considérant les dimensions et l'état de surface des feuilles. Enfin, une mesure de contact produit une ombre portée issue du capteur et de son attache, celle-ci perturbant localement le champ thermique et induisant une forte erreur.

Pour cela, la solution choisie fut de mesurer la température de surface de végétation *via* un thermomètre infrarouge ayant la capacité d'être connecté à une centrale d'acquisition. Le choix s'est porté sur un IR100 de CAMPBELL SCIENTIFIC pour sa connectivité, sa précision ($\pm 0,2^\circ\text{C}$) et le faible angle de mesure ($4-5^\circ$) idéal pour une surface réduite. Bien que le détecteur soit composé d'une thermopile, le capteur est de type actif du fait de la thermistance utilisée afin de connaître la température du capteur (cette dernière influençant la mesure).

La mise en œuvre consiste dans un premier temps à définir la zone d'observation souhaitée (végétation non ombragée). Puis, dans un second temps, à positionner le capteur en direction de celle-ci tout tenant compte de l'ombre portée et de la distance surface/capteur afin que l'angle solide observé corresponde uniquement à la zone d'observation.

3.1.1.4 Température de substrat

La température de substrat est mesurée par le biais d'un thermocouple de type T. Considérant les propriétés géométriques, la convection et les surfaces de contacts (donc la conduction) sont limitées au sein du substrat. De ce fait, le transfert thermique est principalement effectué par les phénomènes d'irradiation de type GLO. Dès lors, la mise en œuvre implique de laisser l'extrémité (soudure) libre, donc sans adhésif réfléchissant, afin de favoriser le transfert radiatif et ainsi la qualité de la mesure.



Figure 3.3 – Le capteur³ IR100

3. Image provenant de la documentation du capteur fournie par le constructeur.

3.1.1.5 Flux de chaleur

Le flux de chaleur est mesuré *via* un fluxmètre composé d'une thermopile⁴. La mise en œuvre est fonction de l'emplacement du capteur.

— *Paroi interne* —

Le fluxmètre est une thermopile, donc un capteur passif, ultra mince de dimensions 10cmx10cm, possédant une sensibilité nominale de l'ordre de $55 \mu V/(W.m^{-2})$ et une erreur relative de $\pm 5\%$. Le capteur est fixé sur la paroi (à l'instar des thermocouples mesurant la température de surface de paroi) par un adhésif peint.

— *Tôle* —

Le fluxmètre est identique à celui utilisé en surface de paroi interne. Toutefois, concernant la mise en œuvre, l'approche est légèrement différente. En effet, considérant l'élévation de la température due aux sollicitations GLO ($T_{tôle} \approx 70^\circ C$) le maintien *via* un adhésif n'est pas possible. La solution utilisée consiste à superposer deux tôles, afin de positionner entre celles-ci le capteur de flux (ultra fin) enduit de pâte thermique.

— *Substrat* —

Enfin, les contraintes associées au substrat (humidité, caractère abrasif, *etc.*) induisent l'utilisation d'un fluxmètre basé sur une thermopile protégée par une coque en matériau composite. Le choix s'est porté sur le HUKSEFLUX HFP01, de diamètre 8 cm ayant une sensibilité nominale $50 \mu V/(W.m^{-2})$ et une erreur relative⁵ comprise dans la plage $[+5\%; -15\%]$. Positionné dans le substrat, le capteur n'est fixé (adhésif peint et pâte thermique) que si celui-ci est au contact d'une paroi. Dans le cas contraire, une attention particulière est apportée à son l'horizontalité.

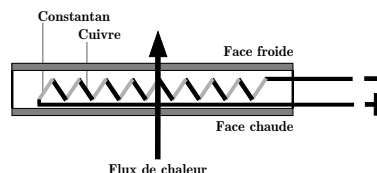


Figure 3.4 – Schéma d'une Thermopile (type T)



Figure 3.5 – Le fluxmètre HUKSEFLUX

3.1.1.6 Albédo de la toiture

L'albédo sur la toiture est obtenu par un albédomètre. Ce capteur est composé de l'association de deux pyranomètres montés en opposition. La valeur de l'albédo est simplement le quotient des irradiances réfléchies et reçues.

Les albédomètres étant soumis aux mêmes sollicitations environnementales, puisque localisés à proximité les uns des autres, les pyranomètres supérieurs mesurent nécessairement les mêmes valeurs (à l'erreur de mesure près). Considérant ceci, un seul pyranomètre supérieur est installé. Les valeurs des albédos sont donc toutes calculées avec les valeurs de ce dernier (Φ_{sup}^{pyr}).

$$\text{Albedo} = \frac{\Phi_{inf}^{pyr}}{\Phi_{sup}^{pyr}} \quad (3.1)$$

Considérant le budget et la présence de matériel disponible au sein du laboratoire, les pyranomètres utilisés sont des CMP11 et CM6B de KIPP & ZONEN ainsi que LP02 de HUKSEFLUX. Ces capteurs passifs ont des erreurs nominales respectivement de $\pm 3,5 W.m^{-2}$, $\pm 7,5 W.m^{-2}$ et $\pm 7,5 W.m^{-2}$ pour une irradiation nette de $200 W.m^{-2}$. À noter que ces derniers ont fait l'objet d'un développement spécifique dû aux conditions d'exploitations. Les erreurs, les adaptations et la mise en œuvre sont explicitées dans la section 4.2.

3.1.1.7 Protection radiative de la canopée : LAI

La protection radiative associée à la canopée est estimée par le LAI.

4. Thermocouples en séries permettant ainsi le cumul des tensions produites par effet SEEBECK.

5. L'erreur relative est fonction du type de sol. Si utilisé sur une paroi l'erreur est de $\pm 5\%$.

Définition

« Le LAI (Leaf Area Index) est une grandeur sans unité qui quantifie la densité de la canopée. Elle est définie comme le ratio de la somme des surfaces foliaires⁶ par unité de surface ».

Cette grandeur peut-être obtenue de diverses manières, selon une approche directe (mesure de la surface de feuilles) ou indirecte (mesure radiative). Dans le but d'avoir un suivi continu, et donc l'évolution circadienne de la protection radiative de la canopée, la seconde approche est utilisée, *via* un ceptomètre⁷ (LP-80 de chez DECAGON). Autonome, le ceptomètre gère de manière indépendante l'acquisition des données au pas de temps de la minute. Ce capteur passif permet ainsi la mesure de l'impact de la canopée sur l'irradiation, et donc l'obtention de la valeur du LAI.

L'acquisition est effectuée à l'aide de deux sondes mesurant l'intensité du rayonnement sur le spectre [400;700] nm et ayant une résolution⁸ de $1 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour une plage de mesure de $[0; 2500] \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Ces sondes étant positionnées en dessus et au dessous de la canopée, la différence de mesure permet d'obtenir la somme de l'irradiation transmise par les feuilles. Celles-ci formant un milieu multi-couche semi-transparent, la transmission du rayonnement à travers la canopée suit alors une loi de type « e^{-x} ». L'utilisation⁹ d'une adaptation empirique de la loi de BEER-LAMBERT, permet alors d'obtenir¹⁰ le LAI.



Figure 3.6 – Le Ceptomètre

3.1.2 Transferts massiques

3.1.2.1 Teneur en eau du substrat

La teneur en eau du substrat est obtenue par une sonde réflectométrique. Plus exactement, par une sonde CS616 de CAMPBELL SCIENTIFIC (erreur relative associée à la mesure de $\pm 2,5\%$). Comme son nom l'indique, cette mesure est basée sur la réflectométrie, *i.e.* : sur l'émission et la réception de signaux électromagnétiques. C'est donc un capteur actif. À noter que la dimension importante du capteur (40cmx6cm) est due aux deux antennes parallèles composées de tiges métalliques de 30 cm.

La mise en œuvre est faite en tenant compte des risques d'interférences (possible si proximité des sondes inférieure à 23 cm). De plus, une attention particulière est portée à l'écartement des antennes ainsi qu'à l'orientation du capteur. En effet, ce dernier est positionné de biais afin d'obtenir une mesure correspondant à la moyenne de la teneur en eau du substrat.



Figure 3.7 – La sonde CS616

Enfin, ce type de sonde est fonctionnelle pour tout type de substrat permettant le transfert de signaux électromagnétiques, ce qui est le cas des sols réunionnais selon PIERRE [1993].

6. Nota : La surface d'une feuille est définie par celle de l'un de ses côtés uniquement.

7. Le ceptomètre nous a été gracieusement prêté le temps des campagnes de mesure par le pôle Élevage du CIRAD, basé à St Pierre de la Réunion.

8. L'irradiation est mesurée *via* les quantas de lumière détectés par les sondes. Son unité est la densité de flux des photons photosynthétiques en $[\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}]$, où $1 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1} = 0,219 \text{ W.m}^{-2}$.

9. Pour plus d'information, se référer à la littérature [GATES, 1980b].

10. L'acquisition du LAI est présentée dans l'annexe 5.

3.1.2.2 Humidité relative

L'humidité relative en surface du substrat ou de la canopée est obtenue par un hygromètre. Existant au laboratoire, les capteurs utilisés sont des MP100A de ROTRONIC et des HMP35A/D de VAISALA. Ces capteurs actifs ont des erreurs nominales respectivement de $\pm 1\%$ et $\pm 2\%$. Toutefois, ces sondes ont fait l'objet d'un développement spécifique dû aux conditions d'exploitations. Les erreurs et la mise en œuvre sont explicitées dans la section 4.1.

3.1.3 Grandeurs climatiques

3.1.3.1 Pression atmosphérique

La valeur de la pression atmosphérique est obtenue par un transducteur, le 278-600M de chez SETRA. Ce capteur actif permet la mesure de la pression atmosphérique avec une erreur de $\pm 1,0$ hPa sur la plage $[0;40]^{\circ}\text{C}$.

3.1.3.2 Irradiation solaire

L'intensité de l'irradiation solaire est obtenue *via* des pyranomètres de type CMP11 de chez KYPP & ZONEN. Étalon secondaire selon la classe ISO 9060 :1990, ils couvrent le spectre $[285;2800]$ nm pour une incertitude journalière inférieure à 2%. Les pyranomètres respectent le standard WMO et sont installés selon les recommandations de ce dernier.

Afin d'obtenir le rayonnement diffus, une protection est associée à l'un des pyranomètres afin de supprimer le rayonnement direct. Cette protection est faite par un anneau d'ombrage (ou bande pare-soleil), le modèle CM121B de chez KYPP & ZONEN est utilisé. Le profil en « U » de l'anneau permet d'obtenir un angle solide (obstruction du champ de vision) constant à $\pm 2\%$ près, quel que soit le réglage de ce dernier.

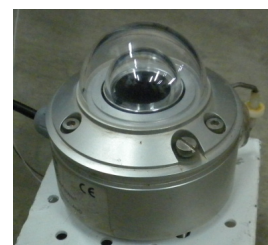


Figure 3.8 – Le CMP11

3.1.3.3 Pluviométrie

La quantité d'eau liquide précipitée est mesurée *via* un pluviomètre. Installé auprès de la station « portable » le modèle utilisé est un SBS500 de chez CAMPBELL SCIENTIFIC. Ce capteur passif, composé d'un auget basculeur, utilise un transducteur basé sur le phénomène d'induction pour produire un signal de type créneau (dirac) indiquant 0,2 mm de pluie à chaque bascule. Aucune précision n'est indiquée par le constructeur pour ce matériel. Toutefois, considérant la sensibilité et les besoins, la variabilité spatiale du phénomène observé permet de négliger cette indication manquante.



Figure 3.9 – Le SBS500

3.1.3.4 Humidité relative et température

L'humidité relative et la température sont acquises *via* une sonde CS215 de chez CAMPBELL SCIENTIFIC. La plage de fonctionnement est de $[0;100]\%$ d'humidité relative (HR) et $[-40;+70]^{\circ}\text{C}$, pour une précision de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ sur $[5;40]^{\circ}\text{C}$ et $\pm 2\%$ sur $[10;90]\%$ (à 25°C). Ce capteur actif produit un signal numérique analysé par la centrale d'acquisition à l'aide d'une fonction dédiée (utilisée lors de la programmation). Afin de fonctionner correctement cette sonde doit être protégée par un abri ventilé, un MET20 de chez CAMPBELL SCIENTIFIC est utilisé à cette fin. L'ensemble est positionné à 1,5 m du sol conformément au standard WMO.



Figure 3.10 – La CS215³

3.1.3.5 Vitesse et direction du vent

Sur la station « portable », les vitesses et directions du vent à 3 m sont obtenues par un anémomètre mécanique à axe horizontal (délivrant vitesse et direction du vent) : le modèle 05103 de chez YOUNG. Ce capteur passif (transducteur basé sur le phénomène d'induction) permet des mesures sur la plage $[1;100] \text{ m.s}^{-1}$ avec une précision de $0,098 \text{ m.s}^{-1}.h^{-1}$.

Sur la station « fixe », la vitesse du vent à 2 et 10 m est obtenue par deux anémomètres à moulinet, modèle A100L2 de chez VECTOR INSTRUMENT. Ce capteur passif (transducteur basé sur le phénomène d'induction) permet des mesures sur la plage $[0,15;77] \text{ m.s}^{-1}$ avec une précision de $1\% \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ (jusqu'à 50 m.s^{-1}).

La direction du vent à 2 et 10 m est quant à elle obtenue par deux potentiomètres (girouettes), modèle W200P de chez VECTOR INSTRUMENT. Ce capteur actif permet des mesures sur la plage $[0,6;75] \text{ m.s}^{-1}$ avec une précision de $\pm 2^\circ$ (si direction stable et vitesse supérieure à 5 m.s^{-1}).

À noter ces anémomètres et potentiomètres sont directement fournis par CAMPBELL SCIENTIFIC.



Figure 3.11 – Les capteurs VECTOR INS.

3.2 Réglages métrologiques

Les éléments présentés ici ont principalement traités à l'étalonnage et le cas échéant à l'ajustage des sondes. Deux niveaux d'étalonnage sont définis : le premier est à échelle du capteur, le second est à l'échelle de l'expérimentation mise en place.

3.2.1 Étalonnage et ajustages des capteurs

3.2.1.1 Fluxmètres

— *Paroi interne et tôle* —

Les fluxmètres situés au niveau de la paroi interne et de la tôle, étalonnés en usine, sont présents depuis plusieurs années. Considérant les difficultés de mise en place d'une procédure d'étalonnage (complexité de mise en œuvre, absence d'étalon¹¹, erreur associée à l'utilisation de l'équation de FOURIER trop importante), une approche alternative a dû être employée. L'approche employée consiste à utiliser le retour d'expérience vis-à-vis de la divergence associée à ces capteurs spécifiques. Le constructeur a été contacté à cette fin (CAPTEC). L'expertise prodiguée indique qu'aucune divergence particulière supplémentaire n'est attendue aux vues des conditions thermiques et hydriques. Ceci, hors détérioration physique. Ainsi, l'aspect des capteurs ayant été vérifié, les mesures obtenues étant cohérentes vis-à-vis des sollicitations et se basant sur l'expertise constructeur, les mesures issues de ces fluxmètres sont considérées correctes.

— *Substrat* —

Les fluxmètres situés dans le substrat ont été achetés spécifiquement pour l'expérimentation. Venant d'être étalonnés en sortie d'usine, un nouvel étalonnage n'est pas nécessaire.

3.2.1.2 Ceptomètre

L'étalonnage de cet appareil est uniquement fait en usine. Toutefois, il est possible d'effectuer l'ajustage automatique afin de limiter la divergence de l'appareil. Cette option, ajuste la mesure du capteur principal (M_p) sur celle issue du capteur externe (M_e), via un facteur de correction (k). Ainsi, les deux capteurs possèdent la même mesure dans des conditions identiques

11. Une procédure d'étalonnage a été initiée en utilisant les fluxmètres HFP01 comme étalon.

Bien que faiblement résistif ($6,25 \cdot 10^{-3} \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$), ce capteur possède une inertie bien plus forte que les fluxmètres ultra-fins testés. Inertie qui rend la procédure non concluante.

($M_p^* = k \cdot M_p = M_e$, avec $k = \frac{M_e}{M_p}$).

Par ailleurs, suite aux mesures simultanées au dessus de la canopée ($M_{e,0}$) et en dessous ($M_{p,z}^*$), la transmittivité (τ_z) de la canopée est calculée. À cette fin, le rapport des mesures ($\tau_z = M_{p,z}^*/M_{e,0}$) est effectué. Or, une fois l'ajustage effectué (jouant uniquement sur un facteur multiplicateur, *i.e.* : pas de biais), l'erreur est identique pour les deux capteurs, et quelle que soit sa valeur celle-ci s'annule lors du rapport. Ainsi, l'erreur de mesure sur le résultat final est limitée.

3.2.1.3 Sondes réflectométriques

Les sondes réflectométriques ont également été achetées spécifiquement pour l'expérimentation, elles sont donc étalonnées d'usine. De plus, l'étalonnage n'est pas nécessaire pour ce type de sonde (pas de divergence temporelle de la mesure).

3.2.1.4 Hygromètres

— Sondes ROTRONIC —

Les hygromètres MP100A ont été étalonnés et ajustés *via* un kit spécifiquement créé à cet effet pour les sondes ROTRONIC. Le principe de ce kit est de placer la sonde dans un environnement dont l'humidité relative est connue grâce à des solutions salines particulières.

Pour ce faire, une chambre en acier brossé est vissée sur la sonde, puis un tampon imbibé d'un sel y est introduit avant de fermer la chambre hermétiquement (fig. 3.12). Une fois l'humidité relative stabilisée (environ 1 heure) l'étalonnage, et si besoin l'ajustage¹², est effectué.

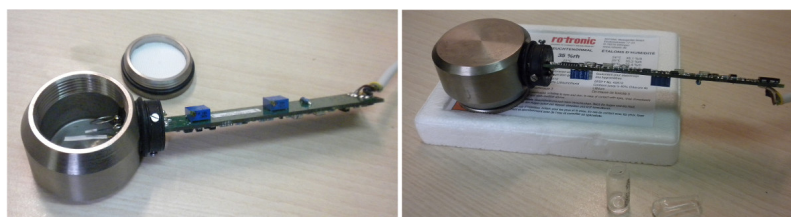


Figure 3.12 – Mise en œuvre de l'étalonnage pour une sonde ROTRONIC.

— Sondes VAISALA —

Les hygromètres HMP35A\D ont été étalonnés et ajustés relativement aux hygromètres MP100A. Pour ce faire, un module spécifique a été créé à cet effet. Cette approche est présentée dans la section 4.1.

3.2.1.5 Albédomètres

Les albédomètres, donc les pyranomètres, ont été étalonnés d'usine il y a plusieurs années. Il est donc impératif de les réétalonner. Les pyranomètres composant l'albédomètre étant soumis à des rayonnements d'intensités très différentes, ceux-ci sont étalonnés en environnement naturel (forte intensité) et vérifiés en environnement contrôlé (faible intensité) afin de corroborer la linéarité de la réponse (*i.e.* : sensibilité indépendante de l'intensité du rayonnement).

— Étalonnage : Forte intensité d'irradiation —

Considérant les contraintes liées à l'acquisition de données fiables¹³, l'étalonnage a eu lieu en environnement naturel (à côté des cellules ISOTEST) durant une journée possédant un ciel particulièrement clair. L'étalonnage est alors effectué à partir de l'irradiation solaire globale du site. L'étalon utilisé est présenté dans les paragraphes suivants.

12. L'ajustage consiste à modifier la valeur lue par le capteur *via* une action mécanique : agir sur une vis (visible sur la figure 3.12) jusqu'à affichage de la valeur souhaitée (valeur fonction du type de sel utilisé). L'ajustage nécessite un ré-étalonnage à posteriori [JCGM, 2012].

13. Difficulté de reproduction de l'intensité exacte sur le spectre des irradiances cumulées CLO, entre autres.

Le tableau 3.1 présente les données statistiques associées aux résultats du pyranomètre le plus divergent (le LP02), les autres capteurs ayant une erreur moyenne dont le maximum est de $0,64 \pm 0,84\%$. Il ressort de cette étude un besoin d'étalonnage du LP02 (a minima). Une fois effectué, les pyranomètres possèdent une erreur moyenne dont le maximum est de $0,08 \pm 0,83\%$.

— Vérification : Faible intensité d'irradiation —

Les pyranomètres positionnés en face inférieure de l'albédomètre mesurent le rayonnement thermique réfléchi par la toiture, flux faible comparé à l'irradiation solaire. L'étude est effectuée en environnement contrôlé (Cf. sec. 4.2.4) les pyranomètres sont positionnés sous un dôme translucide (fig. 4.17), et soumis à un flux radiatif constant et uniformément réparti de l'ordre de 85 W.m^{-2} .

Il ressort de cette étude une corroboration des facteurs de correction obtenus suite à l'étalonnage. Par conséquent, conformément aux attentes, la sensibilité est indépendante de l'intensité du rayonnement. De ce fait, les pyranomètres étalonnés peuvent alors être utilisés afin de concevoir l'albédomètre.

— Étalon secondaire —

Avec une instabilité inférieure à 0.5% par an, le CMP11 peut être considéré comme étalon secondaire, il est par ailleurs qualifié de « *secondary standard* » par la norme ISO 9060 :1990 [KIPP&ZONEN, 2013]. Les CMP11 n'ayant pas été étalonnés depuis cinq ans, une erreur d'instabilité $< 2.5\%$ entache alors la mesure.

Afin de minimiser cette erreur et ainsi effectuer l'étalonnage, un étalon « fictif » est créé : il est défini par la moyenne de quatre CMP11.

À noter que ces pyranomètres (CMP11) ont des données proches de la référence (pas de divergence). En effet, les faibles valeurs de l'erreur relative moyenne maximale (0,64%) et de l'écart type relatif maximal (0,48%) permettent de considérer l'étalon fictif comme fiable.

De plus, à l'instar du ceptomètre (sec. 3.2.1.2) l'erreur issue de l'écart l'étalon fictif/valeur vraie est annulée par le calcul du rapport des mesures.

Table 3.1 – Données statistiques issues de l'étalonnage du pyranomètre n°1.

	Avant Correction			Après Correction		
	$\eta_{ini} [\text{W.m}^{-2}]$	$\varepsilon_{ini} [\%]$	$\sigma_{ini} [\text{W.m}^{-2}]$	$\eta_{cor} [\text{W.m}^{-2}]$	$\varepsilon_{cor} [\%]$	$\sigma_{cor} [\text{W.m}^{-2}]$
Pyr. n°1	30,66	5,63	2,20	0,16	0,03	2,09

Nota : η , ε et σ indiquent l'erreur absolue, l'erreur relative et l'écart type associé à l'erreur absolue.

3.2.1.6 Thermocouples

— Capteurs présents initialement —

Les thermocouples présents initialement sont tous situés dans les ISOTEST. Calibrés lors de leur fabrication sur site, et à plusieurs reprises depuis, ils permettent l'acquisition de mesures cohérentes. De ce fait, l'erreur associée à ces capteurs peut être de deux types : aléatoire ou permanente. Dans le cas présent, des erreurs aléatoires importantes, bien que possibles, sont peu probables, car, considérant la durée d'exploitation des ISOTEST, elles auraient été certainement identifiées. Les erreurs permanentes quant à elles sont un risque avéré. Afin d'effectuer l'étalonnage sans démonter toute l'expérimentation, il a été choisi de tester les capteurs installés *via* un capteur externe, un étalon, spécifiquement positionné à cet effet. L'étalon utilisé pour l'étalonnage des thermocouples est une sonde PT100.

Les thermocouples peuvent être classés selon leurs situations. Il en existe deux : soit au contact d'une surface (donc protégés par un adhésif), ou bien positionné dans l'air (de l'enceinte ou de la lame d'air). Ce second groupe de capteur est plus susceptible de subir une détérioration due notamment à la corrosion (donc une erreur permanente). Considérant ceci, ces thermocouples

ont été étalonnés en priorité¹⁴.

Une campagne de 10 jours a été effectuée. Le tableau 3.2 présente les données statistiques associées au capteur ayant l'erreur la plus importante : le capteur d'air dans l'enceinte de l'ISOTEST n°1. Considérant ces résultats, il est alors possible de considérer que les mesures issues des différents thermocouples de chaque cellule ISOTEST sont correctes. Cette considération étant soumise à l'hypothèse suivante : *avec le temps, l'altération de tous les thermocouples est similaire*. Hypothèse justifiée par le faible écart entre les capteurs en place et les capteurs étalons ; écart très inférieur à l'erreur de mesure de la chaîne d'acquisition : 1 °C [MIRANVILLE, 2002].

Table 3.2 – Données statistiques issues de l'étalonnage des thermocouples.

	Erreur absolue		Erreur relative	
	ε [°C]	σ [°C]	ε [%]	σ [%]
Température sèche d'air ISOTEST n°1	0,01	0,80	0,09	3,04

Nota : ε et σ indiquent l'erreur et l'écart type moyen sur les 10 jours d'étalonnage.

— Capteurs ajoutés —

Les thermocouples ajoutés (créés à cet effet ou non) nécessitent un étalonnage. L'étalonnage est effectué à l'aide d'un bain thermostaté associé à une PT100. Considérant l'environnement dans lequel seront utilisés les capteurs, la plage de température choisie s'étend de 5°C à 90°C. La plage varie par pas de 5°C et 10°C, respectivement sur les domaines [15°C ; 60°C] et [5°C ; 15°C] \cap [60°C ; 90°C]. Enfin, l'étalonnage d'un thermocouple est considéré valide lorsque l'écart-type moyen de son erreur absolue (vis-à-vis de la PT100) tend vers zéro¹⁵.

3.2.2 Vérification de l'expérimentation

L'objectif sous-jacent à l'étalonnage de l'expérimentation est la calibration des supports expérimentaux. Il consiste à effectuer une analyse comparative des systèmes (infrastructures) instrumentés. Il s'agit donc de vérifier que les supports expérimentaux utilisés possèdent un comportement identique (cas idéal), lorsque ceux-ci sont dans les mêmes configurations et soumis aux mêmes sollicitations.

De plus, la notion « d'étalonnage de l'expérimentation » définit l'étalonnage de la chaîne d'acquisition, donc des capteurs, mais également des câblages et de la centrale d'acquisition. L'étalonnage des capteurs ayant été présenté précédemment, il reste donc à valider expérimentalement le câblage et la centrale d'acquisition. Définie dans la section en cours, l'analyse comparative permet de mettre en exergue les mesures défectueuses, principalement dues au positionnement ou aux connexions. Cette approche induit donc une validation du câblage.

Enfin, la vérification de l'erreur due à la centrale ne peut pas être effectuée dans le cadre d'une analyse comparative¹⁶ puisque chaque expérimentation (les bacs et les ISOTEST) possède une unique centrale d'acquisition. De ce fait, l'étalonnage effectué ne permet pas de vérifier l'erreur induite par cet outil essentiel¹⁷. Toutefois, les centrales utilisées ont la propriété de planifier et d'effectuer, sans intervention, un ajustage. Celle-ci permet de réduire les erreurs de lecture dues au vieillissement de la centrale ainsi qu'aux variations de température.

3.2.2.1 Les bacs végétalisés

— Centrale d'acquisition —

14. Considérant les résultats et l'hypothèse posée (définie dans le paragraphe suivant), l'étalonnage effectif des thermocouples du premier groupe n'a finalement pas été nécessaire.

15. En pratique lorsqu'elle est inférieure à 10^{-2} °C.

16. L'analyse comparative aurait été possible à l'aide d'une seconde chaîne d'acquisition qui serait étalonnée.

17. L'erreur induite par la centrale sera spécifiquement développée dans les sections ci-dessous.

Selon les données constructeur, la précision de la centrale affectée aux bacs végétalisés (CR1000) correspond à $\pm 0,12\%$ de la mesure (voltage délivré par le capteur) sur la plage $[-40^\circ\text{C}; +80^\circ\text{C}]$. Toutefois, le constructeur recommande un ré-étalonnage d'usine tous les deux ans, or la centrale a plus de quatre ans. Une investigation a donc été menée afin de déterminer le besoin d'étalonnage. Pour ce faire, les coefficients issus de l'ajustage ont été respectivement comparés à leurs plages de valeurs typiques en sortie d'usine. Considérant le mode d'échantillonnage sélectionné des capteurs connectés, il s'avère que les coefficients utilisés sont dans les plages indiquées. L'utilisation de la centrale est par conséquent possible¹⁸ en l'état.

Cependant, afin de limiter les risques, le système d'exploitation est mis à jour.

Enfin, il est à noter que la centrale d'acquisition traite de manière identique les capteurs de mêmes types. En théorie, une erreur associée à l'échantillonnage d'un capteur sera la même pour tous les capteurs similaires. Or, les données étant utilisées de manière relative les unes aux autres (mesures différentielles), une éventuelle erreur de ce type aurait donc une incidence négligeable.

— Confrontation des résultats —

En plus de l'étalonnage des capteurs explicité précédemment, il est impératif d'étalonner l'expérimentation mise en place. L'étalonnage effectué consiste à confronter les mesures des deux systèmes soumis aux mêmes conditions. Pour ce faire, les deux bacs ont été positionnés, instrumentés et mis en œuvre de manière identique (*i.e.* substrat uniquement). La séquence de mesure a duré 18 jours. Le tableau 3.3 présente les données statistiques issues de la confrontation.

La confrontation des données a consisté à définir les erreurs relatives de chacun des capteurs comparativement à leurs références respectives. Dans le cadre de cette étude, la référence utilisée est définie par la moyenne des mesurandes¹⁹ associés à une grandeur. De ce fait, l'erreur relative entre les capteurs d'une même paire (ex : fluxmètre 1 et 2) est donc le double de celle indiquée. Parmi les résultats, il est à noter que les faibles erreurs présentées, notamment visibles pour le flux, proviennent très certainement d'une différence de hauteur du substrat (± 1 cm pour 10 cm). En effet, considérant la granulométrie, la mise en place des scories n'est pas chose aisée. Toutefois, il s'avère que tous les capteurs possèdent une erreur relative, comparativement à la référence, nettement inférieure à 1% associée à un faible écart-type. L'étape d'étalonnage peut donc être considérée comme validée.

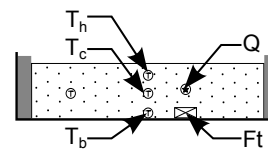
18. Toutefois, un étalonnage constructeur est nécessaire pour certains types de mesures (non utilisées ici).

19. Elles sont au nombre de deux par grandeur observée. Par exemple, la référence pour les fluxmètres est la moyenne à chaque pas de temps des valeurs obtenues issues des fluxmètres 1 et 2.

Table 3.3 – Données statistiques issues de l'étalonnage des bacs.

Mesurande	F_t [W.m ⁻²]	T_h [°C]	T_c [°C]	T_b [°C]	Q [%]
Erreur relative	0,16	0,01	0,02	0,01	0,03
Écart-type	0,25	0,01	0,01	0,01	0,02

Nota : Q définit la teneur en eau dans le substrat.



3.2.2.2 ISOTEST

— Centrale d'acquisition —

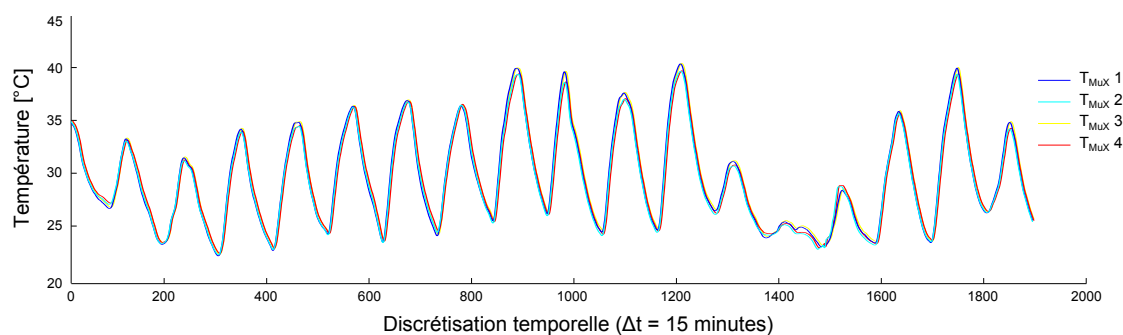
Selon les données constructeur, la précision de la centrale affectée aux ISOTEST (CR3000) correspond à $\pm 0,10\%$ de la mesure (voltage délivré par le capteur) sur la plage $[-40^\circ\text{C}; +80^\circ\text{C}]$. De plus, cette centrale est neuve, c'est à dire fraîchement étalonnée d'usine ; Elle ne nécessite donc pas d'étalonnage.

— Confrontation des résultats —

Dans le but de permettre l'étalonnage des ISOTEST, celles-ci ont été configurées de manières identiques. Soumis aux mêmes sollicitations, il est ainsi possible de comparer l'évolution de leurs champs thermiques respectifs.

La campagne d'étalonnage a été menée durant l'été austral, au mois de décembre et janvier sur une durée de 18 jours. Cette période a eu la particularité de contenir un phénomène climatique extrême : le cyclone BEJISA. Non prévu initialement, BEJISA a permis une variation importante des conditions climatiques, et ce faisant, il a permis d'augmenter la plage d'étalonnage du système expérimental. Considérant ceci, l'échantillonnage associé au cyclone est conservé²⁰.

La confrontation des données a consisté à définir les erreurs relatives de chacun des capteurs comparativement à leurs références respectives. Dans le cadre de cette étude, la référence utilisée est définie par la moyenne des mesurandes²¹. Les principaux résultats sont présentés par le tableau 3.4.

**Figure 3.13** – Étalonnage des températures de référence des multiplexeurs.

Parmi ces derniers se trouve T_{MUX} , la température issue de la PT100 présente dans chacun des AM25T. L'erreur relative observée permet alors d'apporter des précisions quant à l'origine des erreurs au sein de la chaîne d'acquisition (centrale – multiplexeur – capteur). À noter que la (faible : 0,43%) valeur de son erreur se retrouve *in fine* dans toutes les mesures issues de thermocouples. Une attention particulière est également portée aux capteurs de flux, ces derniers n'ayant pu avoir subi de campagne d'étalonnage spécifique. Il ressort une erreur de 6,6%, ce qui est très proche des 5% d'origine ; cette remarque confirme donc l'approche associée à l'étalonnage

20. L'impact du cyclone est visible sur la figure 3.13, aux alentours du pas de temps n°1400.

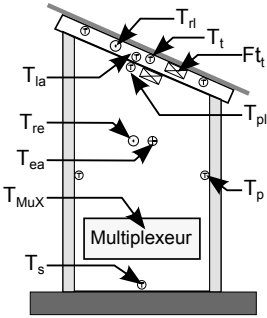
21. Par exemple, la référence pour la température du sol est la moyenne, à chaque pas de temps, des valeurs obtenues pour cette grandeur issues des quatre ISOTEST.

utilisé à leurs égards. Enfin, les thermocouples possèdent une erreur relative de l'ordre de 0,5%. Aux vues de ces résultats, et faibles écarts types associés, l'étalonnage peut donc être considéré comme validé.

Table 3.4 – Données statistiques des capteurs principaux issus de l'étalonnage des ISOTEST.

	F_{t_t} [W.m ⁻²]	T_t [°C]	T_{rl} [°C]	T_{la} [°C]	T_{pl} [°C]
Erreur relative	6,63	0,6	0,5	0,7	0,4
Écart-type	5,74	1,3	0,6	0,8	1,3

	T_{MuX} [°C]	T_{ea} [°C]	T_p [°C]	T_s [°C]	T_{re} [°C]
Erreur relative	0,4	0,4	0,5	0,3	0,4
Écart-type	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9



3.3 Installation sur les supports expérimentaux

L'objet de cette sous-section est de présenter l'instrumentation des supports expérimentaux. Dans cette optique, la chaîne d'acquisition est présentée, allant de la position des capteurs, en passant par les multiplexeurs ainsi que les centrales d'acquisition. Un point est également fait quant aux interférences entre capteurs si nécessaire (ISOTEST).

À noter que la sauvegarde des données stockées par les centrales est effectuée *via* leur mise en réseau, présentée précédemment par la figure 1.3.

3.3.1 Les bacs végétalisés

— Capteurs —

Les capteurs présents dans le substrat sont identiques en nombre et en position dans les deux bacs. Des thermocouples ont néanmoins été ajoutés afin de suivre l'évolution du champ thermique dans la canopée et le terreau. La figure 3.14 détaille spécifiquement l'instrumentation de chacun d'entre eux. Les motivations inhérentes à ceux-ci ont été explicitées dans la section 2.2.1, décrivant la démarche expérimentale suivie. Le paragraphe ci-dessous en détaille la mise en œuvre.

Les thermocouples présents dans le substrat sont torsadés et soudés afin de limiter le risque de rupture de contact. Leur extrémité est laissée libre (pas d'adhésif aluminisé) afin de favoriser le transfert thermique et ainsi la qualité de la mesure. À noter que contrairement aux autres, le thermocouple situé au contact du bac est recouvert d'adhésif ultra fin permettant de maintenir ce dernier au contact de la paroi. De plus, l'adhésif est peint en noir, couleur du bac. Enfin, de la pâte thermoconductrice est utilisée afin de favoriser le transfert thermique. La même approche a été utilisée pour la mise en place du fluxmètre. Pour finir, la sonde réflectométrique est positionnée de biais afin d'obtenir une mesure correspondant à la moyenne de la teneur en eau du substrat.

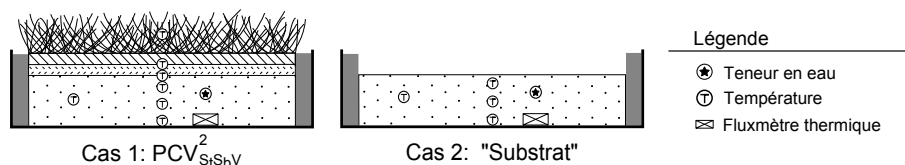


Figure 3.14 – Détail de l'instrumentation dans les bacs végétalisés

— Multiplexeur et centrale d'acquisition —

L'acquisition des données est effectuée au pas de temps de la minute par une centrale d'acquisition (CR1000 - CAMPBELL SCIENTIFIC) située à proximité des bacs végétalisés dans un boîtier étanche. Avec ses quinze capteurs, l'usage d'un multiplexeur est nécessaire. Il s'agit d'un AM25T, ce dernier est également situé dans le boîtier étanche.

Le synoptique de la chaîne d'acquisition de mesures des bacs est présenté par la figure 3.15.

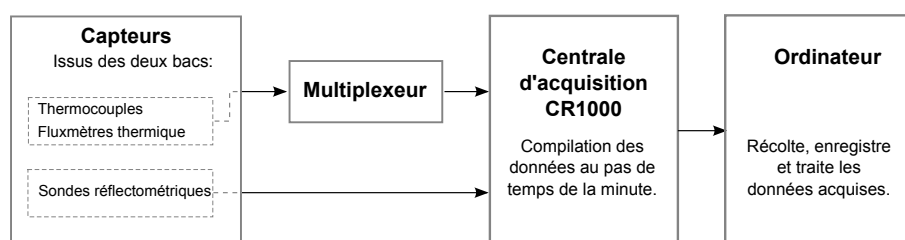


Figure 3.15 – Synoptique de la chaîne d'acquisition de mesures des bacs végétalisés

3.3.2 Les modules ISOTEST

3.3.2.1 Interférence des capteurs

La faible dimension de la cellule ISOTEST implique une attention particulière quant aux risques d'interférences des capteurs.

La notion d'interférences s'applique tout naturellement aux sondes réflectométriques. Toutefois, dans la chaîne d'acquisition construite, elles n'impactent pas les autres capteurs et ne peuvent pas perturber leurs mesures respectives puisque espacées de plus de 23 cm. Les thermocouples et thermopiles (fluxmètres), quant à eux, sont basés sur une technologie passive et sans interaction possible²². De ce fait, l'enceinte ainsi que la lame d'air et le substrat sont exempts d'interférences.

Enfin, sur la toiture sont concentrés quatre capteurs assez volumineux : le peigne thermique (thermocouples), la sonde HR, le thermomètre IR et l'albédomètre (fig. 3.17). Considérant la surface très réduite (1 m²), les capteurs en toitures représentent un risque avéré d'interférence. Elles se manifestent *via* les ombres portées (thermomètre IR, albédomètre et sonde HR) ainsi que par la perturbation du champ de vision de l'albédomètre. Afin de limiter ces interférences, une étude a été menée. Elle a consisté à déterminer l'agencement de ces divers capteurs influant le moins sur leurs mesures respectives. Pour cela, compte tenu de l'aspect dynamique des ombres portées, le logiciel GOOGLE SKETCH-UP a été utilisé. La figure 3.16 présente la solution finale. À noter que le champ de vision de l'albédomètre est nécessairement impacté par les autres capteurs considérant les dimensions de la toiture. Cet impact est limité en maximisant la surface non perturbée. *Nota* : l'albédomètre a été adapté afin d'effectuer la mesure uniquement sur cette dernière (sec. 4.2), représentée par la surface violette sous l'albédomètre.

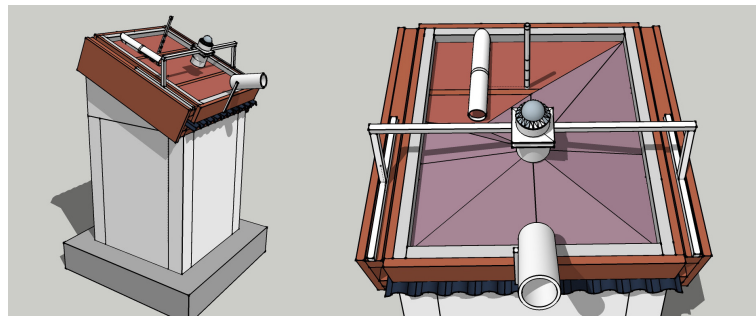


Figure 3.16 – Agencement optimal des capteurs en surface de toiture de l'ISOTEST

3.3.2.2 chaîne d'acquisition

— Capteurs —

Les capteurs présents sont identiques en nombre et en position dans les enceintes de chacune des ISOTEST. Par contre, ils diffèrent selon la conception de toiture choisie. La figure 3.17 détaille spécifiquement l'instrumentation de chacune d'entre elles.

Les températures sèches d'air ainsi que les températures radiantes moyennes sont composées d'un thermocouple positionné dans un environnement protecteur. Il s'agit, respectivement, d'un cylindre²³ en aluminium (afin de minimiser les impacts advectifs) ainsi que d'une sphère²⁴ creuse peinte en noir (afin de maximiser les échanges radiatifs). Les thermocouples présents dans le substrat sont torsadés et soudés afin de limiter le risque de rupture de contact. Leur extrémité est laissée libre (pas d'adhésif aluminisé) afin de favoriser le transfert thermique et ainsi la qualité de la mesure.

22. Toutefois, leurs mesures sont susceptible d'être perturbées si présence d'un fort champ électromagnétique.

23. Positionné verticalement et de dimensions : 6 cm de diamètre pour 15 cm de longueur.

24. De diamètres 15 cm et 3 cm dans l'enceinte et la lame d'air, respectivement.

Concernant les thermocouples en surface de toiture (dans l'air ou bien la canopée), ces derniers nécessitent un support afin d'être maintenus à la position voulue. Pour ce faire, une disposition en colonne étant souhaitée, le « peigne thermique » est créé *via* l'utilisation d'un tube en PVC ($\varnothing 20\text{ mm}$). Enfin, les thermocouples au contact d'une paroi sont recouverts d'adhésif ultra fin permettant de maintenir le contact entre ces derniers. De plus, l'adhésif est peint en blanc, couleur de la paroi. Enfin, de la pâte thermoconductrice est utilisée afin de favoriser le transfert thermique²⁵.

La même approche a été utilisée pour la mise en place des fluxmètres en surface du plafond. Toutefois, l'approche est légèrement différente pour les fluxmètres au contact de la tôle. En effet, considérant l'élévation de la température due aux sollicitations CLO ($T_{tôle} \approx 70^\circ\text{C}$) le maintien *via* un adhésif n'est pas possible. La solution utilisée consiste à superposer deux tôles afin de positionner entre celles-ci le capteur de flux (ultra fin) enduit de pâte thermique.

Les sondes réflectométriques permettant l'acquisition de la teneur en eau du substrat sont positionnées de biais afin d'obtenir une mesure correspondant à la teneur en eau moyenne dans le scorie.

Pour finir, les albédomètres ainsi que les sondes d'humidité relative sont positionnées en surface de toiture suite à une étude particulière considérant la faible superficie et le risque d'interaction.

Cette étude ainsi que les développements spécifiques associés sont présentés dans la section 4.

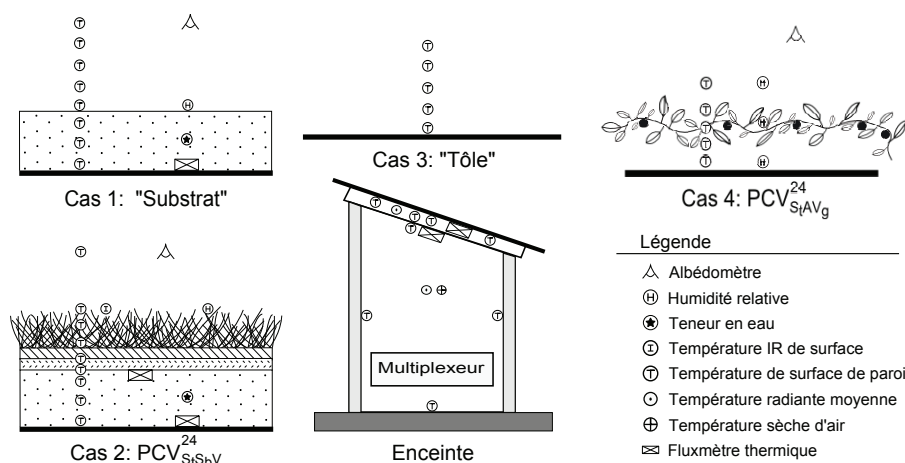


Figure 3.17 – Détail de l'instrumentation des cellules ISOTEST

— Multiplexeurs —

L'acquisition des données est effectuée au pas de temps de la minute par la centrale d'acquisition située dans le locale technique. À 30 mètres de distance, les quatre ISOTEST possèdent en tout plus de 100 capteurs tous relevés par la centrale. Considérant la distance et le nombre limité de canaux sur la centrale, des multiplexeurs sont utilisés. Il s'agit de quatre AM25T²⁶ (à semi-conducteurs pour plus de précision, de marque CAMPBELL SCIENTIFIC) répartis dans les ISOTEST afin de permettre les connexions ainsi que de limiter la distance capteur/branchement et donc les pertes de signal.

25. Conductivité thermique augmentée d'un facteur ~ 30 . Cf. note 3, section 3.1.1.1.

26. Le choix des multiplexeurs date de la mise en place initiale des cellules ISOTEST. Ils n'ont pas été modifiés, car une solution alternative a été trouvée (voir note 27).

— Centrale d'acquisition —

Dans le but d'adapter l'infrastructure à l'étude des PCV il a fallu modifier la chaîne d'acquisition existante. En effet l'étude d'une PCV_H induit l'utilisation de capteur ne se branchant pas sur un multiplexeur de type AM25T, mais directement²⁷ sur la centrale (sondes réflectométriques CS615 par exemple). Ces sondes augmentant le nombre de canaux et de voies actives nécessaires la CR10X (CAMPBELL SCIENTIFIC) initialement présente a été remplacée par une CR3000. Le synoptique de la chaîne d'acquisition de mesures des cellules ISOTEST est présenté par la figure 3.18. Enfin, la figure 3.17 détaille spécifiquement l'instrumentation de chacune des toitures des ISOTEST ainsi que leurs enceintes (identiques pour toutes les ISOTEST).

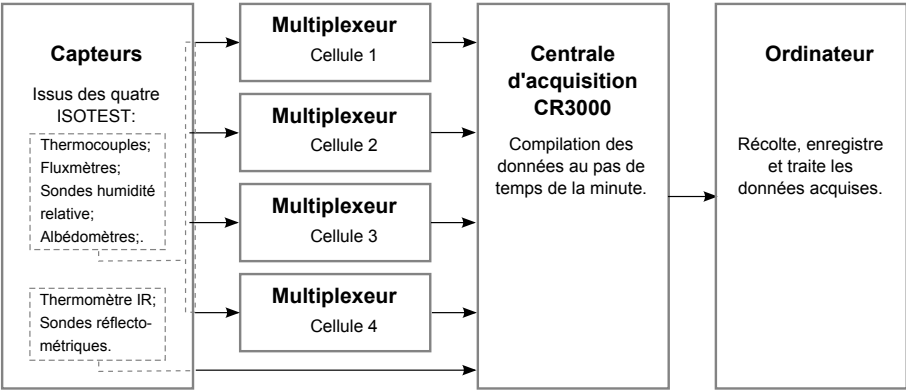


Figure 3.18 – Synoptique de la chaîne d'acquisition de mesures des cellules ISOTEST

27. Distant de plus de 30 m la connexion sur la centrale ne fut pas aisée. Toutefois, une solution temporaire a été trouvée *via* l'utilisation des câbles de secours. Ces derniers avaient été prévus pour les multiplexeurs lors de la conception de la plateforme expérimentale voilà plusieurs années.

Section 4

Développements spécifiques

L'objet de cette section est de présenter les développements spécifiques mis en place afin d'adapter les capteurs (hygromètres et albédomètres) aux conditions d'exploitations; *i.e.* : à la faible surface des toitures étudiées ($\sim 1 \text{ m}^2$). Pour ce faire, les démarches scientifiques utilisées ainsi que les étapes de conceptions et d'étalonnages (capteur, système) sont explicitées.

4.1 Hygromètres

4.1.1 Objectifs

Dans le but de permettre l'optimisation du modèle associé aux phénomènes d'évaporation et de transpiration, le choix a été fait de mesurer la teneur en eau dans l'air de la canopée. À cette fin, les sondes hygrométriques utilisées sont de deux types : ROTRONIC (MP100A) et VAISALA (HMP35A/D). Celles-ci n'ayant pas été utilisées depuis plusieurs années il a été nécessaire d'effectuer un ajustage¹ puis un étalonnage (thermique et hydrique) de ces sondes. Enfin, considérant les dimensions des systèmes étudiés (notamment leurs canopées), il apparaît que l'utilisation classique des sondes hygrométriques (verticale dans un abri) n'est pas adaptée. En effet, il est nécessaire que la sonde suive la pente de la toiture (24°) dans un abri limitant l'impact sur le champ thermique de la PCV. Ce besoin est extrêmement spécifique; à notre connaissance, aucun abri de ce type n'existe sur le marché. Il est donc nécessaire de développer un abri correspondant aux besoins de l'expérimentation.

La présente sous-section définit donc l'ajustage et l'étalonnage hydrique des sondes utilisées. Ensuite vient la présentation de la conception et du développement des protections créées. Pour finir, l'étalonnage des capteurs² est présenté.

4.1.2 Ajustage et étalonnage des hygromètres

4.1.2.1 Méthodologie

Les sondes nécessitent d'être ajustées et étalonnées. À cette fin, un kit d'ajustage est utilisé. Basé sur des solutions salines, il permet d'étalonner les sondes à 85%, 35% et 10% d'humidité relative (sec. 3.2.1.4). Spécifique aux sondes MP100A, ce kit ne peut pas être utilisé par les sondes HMP35A/D; il a alors été nécessaire de définir une autre approche pour ces dernières.

L'approche développée consiste à positionner les sondes dans un environnement dont l'humidité relative est adaptable aux besoins ($>80\%$ et $<35\%$ pour les sondes HMP35A/D). Ces taux

1. L'ajustage quant à lui n'est effectué que pour l'hygrométrie, les PT100 ou thermistances ne s'ajustant pas.
2. La notion de capteur définit ici l'ensemble {sonde + protection}.

étant obtenus par évaporation et dessiccation, les valeurs exactes sont obtenues par les sondes MP100A dont l'échantillonnage moyen définit la mesure étalon.

Enfin, une fois l'ajustage terminé, l'étalonnage est effectué à un taux d'humidité relative intermédiaire (70%).

4.1.2.2 Création du module d'ajustage

4.1.2.2.1 Cahier des charges

L'objectif du module est de permettre l'ajustage des sondes hygrométriques. Il est donc nécessaire que ce dernier possède une humidité relative adaptée et connue. Par ailleurs, il est impératif que les vis d'ajustage des sondes soient accessibles lors de la procédure.

4.1.2.2.2 Conception

Considérant le temps de conception ainsi que le matériel nécessaire, le choix a été fait de créer un module dont la conception est simple. En ce sens, l'usinage d'un kit, à l'instar de celui utilisé pour les sondes MP100A, adapté aux sondes HMP35A/D est écarté.

Le module conçu (fig. 4.1) est alors composé d'une enceinte translucide hermétique de $26 \cdot 10^{-3} m^3$ dans laquelle sont placées les sondes hygrométriques. Dans le but de créer des conditions identiques pour chacune des sondes, celles-ci sont positionnées à équidistance de la source d'humidité (sur une grille métallique). Des membranes souples sont installées de part et d'autre du module afin de permettre une manipulation des sondes en son sein, et donc l'accès aux vis d'ajustage. Enfin, une troisième membrane souple est présente dans le but de limiter la variation du volume d'air dû à la manipulation, et donc limiter la variation de la pression de l'air au sein du module, cette dernière influant sur l'humidité relative.



Figure 4.1 – Module développé pour l'ajustage des sondes hygrométriques.

4.1.2.2.3 Mode opératoire

— Procédure —

Afin de permettre l'ajustage, le module doit être positionné dans un environnement contrôlé (température et humidité constante), donc découplé des sollicitations météorologiques (irradiation). Le mode opératoire consiste alors à positionner l'élément contrôlant l'humidité dans la soucoupe (sous la grille), puis à fermer hermétiquement le module après avoir installé les sondes hygrométriques. Suite à la stabilisation du taux d'humidité relative (environ 2 heures) l'ajustage est effectué. Il s'agit de modifier la valeur lue par la sonde ajustée afin qu'elle affiche la même valeur que celle de la référence (moyenne des sondes MP100A dans le cas présent). Afin de ne pas rompre l'étanchéité, l'accès aux sondes se fait grâce aux membranes souples présentes sur les parois latérales.

Selon la documentation constructeur, les sondes HMP35A/D nécessitent un étalonnage à deux points : faible et forte humidité relative. La procédure est donc répétée deux fois, chacune ayant une humidité relative différente.

— Faible HR —

Le faible taux d'humidité relative correspond à un taux de l'ordre de 35%. Afin d'obtenir un tel taux, un dessiccant est utilisé. Pour des raisons de sécurité et d'accessibilité, le choix s'est porté sur le chlorure de calcium (CaCl_2). La masse de CaCl_2 (M_{CaCl_2}) nécessaire pour atteindre les 35% d'humidité relative est obtenue *via* la loi des gaz parfaits. L'équation 4.1 explicite la formule obtenue spécifiquement pour le CaCl_2 , où P_v^{sat} est la pression partielle de vapeur d'eau à saturation, T la température dans le module et HR l'humidité ambiante avant dessiccation.

$$M_{\text{CaCl}_2} = \frac{P_v^{\text{sat}}(T) \times [HR - 0,35]}{28 T} \quad (4.1)$$

Nota : une erreur de mesure de $\pm 1\text{g}$ induit une erreur d'humidité relative théorique de $\pm 2,8 \cdot T \cdot P_v^{\text{sat}}(T)^{-1}\%$.

— Forte HR —

Le fort taux d'humidité relative correspond à un taux de l'ordre de 80%. Afin d'obtenir un tel taux, un faible volume d'eau liquide est utilisé. La surface libre de l'eau permet alors une évaporation jusqu'à saturation de l'air dans l'enceinte. La cinétique de ce phénomène étant de type $e^{-1/x}$, l'évolution de l'humidité relative est faible à proximité de la valeur de saturation. Cette évolution a été mesurée entre 80% et 90%, la durée obtenue est de 50 *min* à 25°C. Considérant ceci, il est alors possible d'approximer l'humidité relative constante sur cette plage durant l'ajustage des sondes (quelques dizaines de secondes).

4.1.2.3 Étalonnage des sondes sans protection

— Environnement contrôlé —

L'étalonnage des sondes a eu lieu dans une enceinte caractérisée par une irradiation globale (CLO + GLO) de faible intensité et par une température contrôlée par le biais d'une climatisation. Se faisant la variation de l'humidité relative évolue sur la plage [62;72]% (valeurs intermédiaires aux valeurs utilisées pour l'ajustage) durant 45 heures.

Suite au post-traitement des données obtenues, il apparaît que les mesures issues des sondes possèdent des erreurs absolues quasiment constantes (écart-type maximal de 0,35%). Ces erreurs sont donc dues à des biais (compris sur $[-2,05; 1,89]\%$). Après correction, l'erreur absolue la plus importante est de 0,35%. Suite aux actions d'ajustage et d'étalonnage, les sondes sont alors aptes à être utilisées.

— Environnement naturel —

L'étalonnage ayant été effectué en environnement contrôlé, il est ensuite effectué en environnement naturel afin de vérifier le bon fonctionnement des sondes dans leurs conditions d'utilisation finale. Afin de vérifier les valeurs obtenues, la référence est une sonde MP100A protégée par un abri conçu à cet effet (écran radiatif MET21 de CAMPBELL SCIENTIFIC), les autres sondes sont sans écran radiatif.

Positionnées sur un banc d'essai par une journée ensoleillée (ciel clair), les mesures obtenues révèlent des tendances similaires. Toutefois, comparativement à la référence, les amplitudes possèdent une importante divergence (allant jusque 50%) due à l'absence de protection radiative.

Considérant ceci, il est donc impératif d'associer chacune des sondes avec une protection pour un usage en environnement naturel (principalement vis-à-vis du rayonnement CLO).

4.1.3 Développement des protections

Suite à la séquence d'étalonnage en environnement naturel, il s'avère que les sondes nécessitent une protection radiative afin que l'échantillonnage effectué soit représentatif de la grandeur souhaitée. Or à notre connaissance, aucun modèle de protection correspondant au cahier des charges n'existe sur le marché. Toutes les protections sont trop volumineuses³, impactant de ce fait le champ thermique de la PCV.

4.1.3.1 Approche

— *Cahier des charges* —

Afin d'être adaptée à la faible surface de la PCV ($\sim 1 \text{ m}^2$), la sonde doit être positionnée de manière à ce que la partie sensible soit la plus proche de la végétation (afin de limiter les effets de bords). De plus, bien qu'à proximité de la végétation, l'impact sur le champ thermique doit être minimal. Enfin, les caractéristiques thermiques et hydriques de l'air au contact de la sonde doivent tendre vers celles de l'air à l'extérieur de la protection.

— *Approche conceptuelle* —

La sonde est positionnée de manière à suivre la pente de la PCV (24°). Afin de limiter l'impact sur le champ thermique de la PCV la protection est de forme cylindrique (diamètre : 50 mm). Enfin, la réduction de la dérive thermique au sein de cette dernière (due à l'irradiation) a fait l'objet d'une optimisation expérimentale. L'évolution de l'approche est présentée sec. 4.1.3.2.

— *Méthodologie de validation* —

Dans le but de valider l'usage de la protection créée, une approche expérimentale comparative a été mise en œuvre. Pour cela un banc d'essai a été positionné sur une toiture-terrasse recouverte de scories (conditions similaires à celle de l'expérimentation). Le banc est instrumenté afin d'acquérir au pas de temps de la minute la vitesse et direction du vent ainsi que l'humidité relative et la température de l'air (fig. 4.9). Ces deux derniers mesurandes sont obtenus par l'une des sondes MP100A protégée par un écran radiatif (MET21). La centrale utilisée est une CR10X-PB de CAMPBELL SCIENTIFIC.

Positionnées sur le banc d'essai, les protections sont testées à l'aide des sondes étalonnées durant des séquences de 120h continu minimum. Les données obtenues sont alors comparées à celles de la référence. Dans le cas d'erreurs non négligeables, la protection est modifiée, réitérant la séquence de test. Dans le cas contraire, la protection est considérée adéquate, elle est alors dupliquée pour l'étalonnage de chacune des sondes.

4.1.3.2 Recherche de la protection adéquate

En vue d'obtenir une mesure ayant une erreur acceptable, la protection développée initialement est testée selon la méthodologie présentée précédemment. Modifiés à de nombreuses reprises durant l'étude, voici les prototypes créés, ils définissent le cheminement effectué lors des recherches conduisant à la conception adéquate. Les images correspondant aux prototypes sont présentées figure 4.9. Les mesures associées à ces derniers sont présentées figure 4.8.

3. La protection la plus compacte est le MET20, de CAMPBELL SCIENTIFIC (diamètre : 165 mm, hauteur : 172 mm). Dimensions bien trop importantes comparativement à une surface de 1 m^2 .

— Prototypes 1 et 2 : Surchauffe et Inertie —

Afin de répondre au cahier des charges, le prototype initial est conçu à partir d'un tube PVC de 50 mm de diamètre, dont la longueur (350 mm) permet de protéger intégralement la sonde. Peintes en blanc pour limiter la surchauffe, des ouvertures sont présentes aux extrémités du tube ainsi que sous celui-ci. Ces dernières sont protégées par un voilage très fin, permettant à l'air de circuler, mais protégeant des insectes et de l'eau liquide. Il s'avère que cette approche induit des erreurs de mesure maximale de 30% le jour. Celles-ci sont semble-t-il dues à la surchauffe de la protection.



Figure 4.2 – Prototype 1

Dans le but de vérifier cette hypothèse un ventilateur⁴ est positionné sur le prototype. Les erreurs obtenues sont de l'ordre de 6%. La surchauffe est donc bien la source d'erreur principale. Elle provient possiblement de divers paramètres, dont la plus importante est l'absorption de l'irradiation solaire. La source d'erreur étant déterminée, le module peut alors être modifié afin de réduire cette dernière.

Le second prototype est donc formé du prototype n°1 recouvert d'un PMR, complexe composé dans ce cas de mousse PVC associée à une feuille d'aluminium. Il en résulte une diminution de l'erreur maximale en journée qui plafonne à 23%. Le transfert massique n'est donc pas suffisant au sein de la protection. De plus, considérant la répartition temporelle des erreurs, il apparaît que l'inertie de la protection influe sur la température dans la protection.

— Prototypes 3 à 5 : Artefacts dus à l'irradiation directe —

Le prototype n°3 est une réponse aux écueils relevés précédemment. De ce fait, le corps de la protection est maintenant composé d'une feuille d'aluminium d'épaisseur 0,5 mm (dimensions du cylindre identiques), permettant ainsi de limiter l'inertie du système. Cette nouvelle approche permet de réduire l'erreur observée à 12%. Toutefois, il apparaît que celle-ci est due à un phénomène spécifique : la réflexion de l'irradiation solaire dans le tube lorsque les rayons possèdent une faible élévation.



Figure 4.3 – Prototype 3

Le prototype n°4 possède alors des extrémités adaptées afin d'éviter la réflexion (taille en biseau). De plus, la sonde est protégée de la surchauffe de l'aluminium par l'ajout en face interne d'un complexe isolant+PMR (utilisé pour le prototype n°2). Ces modifications permettent de limiter l'erreur maximale à 7%.



Figure 4.4 – Prototype 4

4. Dédié au refroidissement des processeurs d'ordinateur. Caractéristiques : 50×50 mm, 12 V, 1,92 W.

Considérant leurs répartitions temporelles, l'erreur est principalement due aux rayonnements de faible élévation qui ont tendance à pénétrer dans le cylindre.

Le prototype n°5 est également conçu afin de limiter l'irradiation dans le cylindre, mais selon une approche différente de celle proposée par le prototype n°4. Elle est basée sur les considérations suivantes : l'irradiation induit des réflexions multiples au sein du prototype (surfaces aluminisées), celles-ci augmentant la température locale et affectant de ce fait la mesure. Afin de limiter cet écueil, des manchons (diamètre 7cm), dont la face interne est peinte en noir, sont ajoutés aux extrémités du cylindre. Ces modifications permettent ainsi de limiter l'erreur maximale à 6%. Considérant l'évolution des températures, il s'avère que cette solution n'est pas optimale, une augmentation des transferts aérauliques permettrait de diminuer l'erreur de mesure.

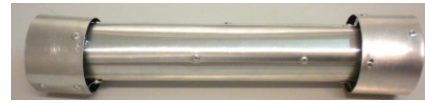


Figure 4.5 – Prototype 5

— Prototype 6 : Transferts aérauliques insuffisants —

Le prototype n°6 propose une approche radicalement différente⁵. Dans le but de favoriser la protection radiative et les transferts aérauliques, un « bouclier radiatif » composé d'aillettes est défini. Créé en feuilles d'aluminium, la faible inertie de ce matériau associée à sa forte effusivité permet de limiter la surchauffe de l'air au contact de la sonde. Les ailettes quant à elles ont pour fonction de limiter le rayonnement incident dans l'enceinte. Cet objectif est atteint grâce à leur forme, ainsi que par leurs couleurs (externe : métal, interne : noir mat). À noter que la forme des ailettes est géométriquement optimisée afin de favoriser le transfert aéraulique.

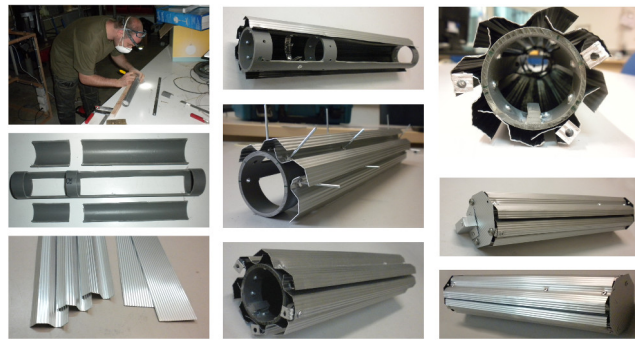


Figure 4.6 – Prototype 6

L'erreur de mesure associée à cette approche est de 10%, donc plus importante que celle de l'approche précédente. Toutefois, ce résultat n'est pas représentatif de l'approche utilisée, mais de sa conception. En effet, bien que les ailettes aient été optimisées d'un point de vue théorique, considérant l'outillage à disposition, la précision nécessaire lors de leurs matérialisations était inaccessible. Cette voie, pourtant prometteuse, a donc dû être abandonnée.

— Prototype 7 : Solution adéquate et suffisante —

La mesure du champ thermique par imagerie infrarouge en surface du prototype 5 a permis de mettre en exergue la surchauffe des manchons et donc la nécessité d'une découpe en biseau⁶. Par conséquent, le prototype 7 est basé sur les prototypes n°4 et 5. Constitué en aluminium, avec la face interne peinte en noir mat pour absorber les rayonnements, les manchons possèdent un diamètre supérieur à celui du cylindre afin, d'une part, que la circulation de l'air favorise le refroidissement, et d'autre part afin d'isoler thermiquement les manchons du cylindre.

Cette conception limite les artefacts dus à l'irradiation directe. Elle induit une erreur maximale de 5,5% et une erreur moyenne de $1,40 \pm 1,39\%$. Sachant que les sondes MP100A et HMP35A/D possèdent une erreur de mesure respectivement de $\pm 1\%$ et $\pm 2\%$, l'erreur moyenne obtenue est

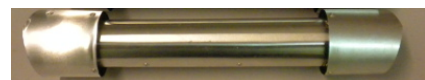


Figure 4.7 – Prototype 7

5. Le principe de cette approche est inspiré des protections radiatives présentes sur le marché (ex : le MET20).

6. L'angle découpe de chacun des manchons, spécifiques à la localisation géographique, à l'orientation et au positionnement futur, sont obtenus *via* un code de calcul développé à cet effet.

alors considérée acceptable. Considérant ceci, le prototype n°7 est considéré comme une solution adéquate et suffisante.

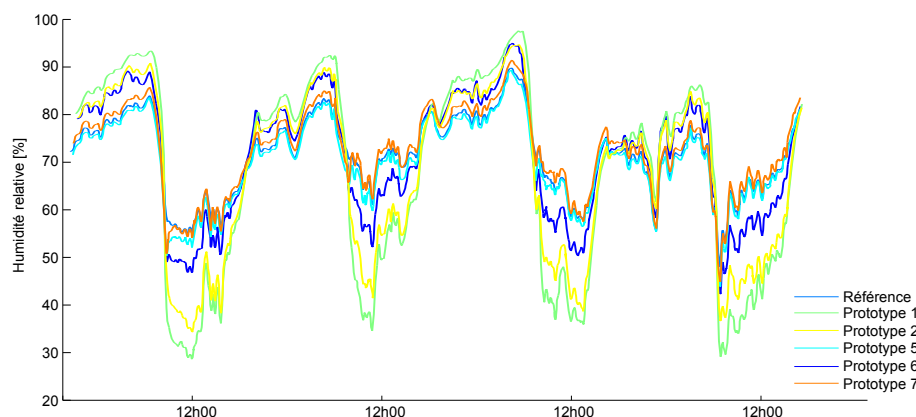


Figure 4.8 – Mesures obtenues avec les principaux prototypes.



Figure 4.9 – Banc d'essai et prototypes de protection testés.

4.1.4 Étalonnage des capteurs finaux

Suite au choix du prototype utilisé, les sondes hygrométriques se voient affectées d'une protection hydrique et radiative. Se faisant, un étalonnage des capteurs (sondes + protections) est alors nécessaire : les cinq capteurs créés sont donc positionnés sur le banc d'essai (configuration identique). Suite à une séquence expérimentale de 10 jours, un traitement statistique a été effectué. La moyenne des indicateurs circadiens par capteur nous permet d'obtenir (le jour⁷) une erreur maximale de $5,72 \pm 0,51\%$, une erreur absolue moyenne de $1,39 \pm 0,16\%$ et un écart type de $1,40 \pm 0,06\%$. Il apparaît que les cinq capteurs possèdent un comportement similaire (erreurs faibles) engendrant une erreur, vis-à-vis de la référence⁸, considérée acceptable. À noter que la source de ces erreurs provient probablement d'une combinaison entre une légère erreur issue de la différence de conception des protections et d'une légère divergence des sondes due à l'âge.

Enfin, le comportement similaire observé induit une comparaison possible entre les capteurs. En effet, prenant l'un d'eux comme référence il apparaît une erreur maximale de $1,52 \pm 0,68\%$, une erreur absolue moyenne de $0,43 \pm 0,23\%$ et un écart type de $0,44 \pm 0,22\%$.

4.1.5 Synthèse

Dans le but de pouvoir obtenir la mesure de l'humidité spécifique sur les toitures des ISOTEST (faibles superficies), il a été nécessaire, d'ajuster et étalonner les sondes hygrométriques, soit

7. Considérant la différence des comportements journaliers et nocturnes, la caractérisation du comportement des sondes est dissociée selon ces périodes (erreurs plus importantes le jour que la nuit – Cf. Fig. 4.8).

8. La référence est composée d'une sonde MP100A dans une protection MET20 (à gauche sur la figure 4.9).

grâce à l'utilisation d'un kit constructeur (sondes MP100A), soit par un le biais d'un module spécifiquement créé à cet effet (sondes HMP35A/D).

Considérant la faible superficie de la toiture, il a fallu adapter la mise en œuvre des sondes, et par conséquent modifier leurs protections. Les protections présentes sur le marché ne répondant pas aux besoins, un développement spécifique a été nécessaire. Celui-ci a nécessité la conception d'outils physiques (banc d'étalonnage) et logiciels (multiples modules permettant de mettre en place les expérimentations et de traiter les données en vue de leurs analyses). Le septième prototype a permis d'obtenir des mesures entachées d'une erreur considérée comme acceptable, permettant l'étalonnage sur 10 jours des capteurs obtenus ({sondes+protections créées}). Il ressort une erreur absolue moyenne de $1,40 \pm 1,39\%$ comparativement à la référence et une erreur absolue moyenne inter-capteurs de $0,43 \pm 0,44\%$. Les mesures étant considérées conformes aux besoins, les capteurs ont donc pu être installés sur l'expérimentation.

4.2 Albédomètres

4.2.1 Objectifs et méthodologie

La fonction de l'albédomètre est d'acquérir la réflectivité thermique de la toiture. Cette mesure est permise grâce à deux pyranomètres montés en opposition (fig. 5.11, image en bas à droite). Ces capteurs ont la propriété d'avoir un champ de vision de 2π stéradian, hors la toiture possède diverses sondes sur une superficie d' 1 m^2 uniquement (cf. 3.3.2.1) ; Il est donc nécessaire d'effectuer une adaptation. Pour cela, un « cylindre » a été créé dans le but de réduire le champ de vision du pyranomètre orienté vers la toiture. Ainsi, seule la surface souhaitée est mesurée.

Afin d'aboutir à une telle mesure, diverses étapes ont été nécessaires. Il a fallu dans un premier temps déterminer où seront positionnés les albédomètres, puis concevoir les cylindres en fonction de cette localisation. Ensuite, un banc d'essai a été créé en vue d'obtenir les facteurs de corrections de cylindres⁹, puis définir le protocole et vérifier sa reproductibilité. Enfin, suite à l'étalonnage des capteurs en conditions réelles, les corrections ont été acquises *via* le banc d'essai et l'efficacité des cylindres a été vérifiée sur site.

4.2.2 Montage sur les ISOTEST

4.2.2.1 Position

Dans l'optique d'obtenir une mesure précise, la position de l'albédomètre a été étudiée. Considérant la superficie de la toiture, l'environnement et les capteurs présents, deux solutions étaient envisageables concernant le positionnement de ce dernier : sur un mât ou sur la toiture (près de la surface). Bien que recommandé¹⁰ par la WMO, la première solution possède l'inconvénient de l'éloignement (2m minimum de la toiture), ce qui induit un faible angle solide de la surface observée et donc une faible précision du résultat final. La seconde solution ne possède pas cet écueil, mais au prix de l'influence de l'ombre portée. Toutefois, malgré celle-ci, l'angle solide de la surface observée est nettement plus important. L'albédomètre est donc positionné en surface de toiture, sur un portique conçu à cet effet (fig. 5.10).

4.2.2.2 Optimisation de la hauteur

Afin de limiter l'impact de l'ombre, une optimisation de la hauteur du capteur a été effectuée. Celle-ci est basée sur la maximisation de la fonction de coût suivante : $F_c(z) = \Omega_S(z) - \Omega_O(z)$. Avec, issus du pyranomètre, $\Omega_S(z)$ et $\Omega_O(z)$ les angles solides respectifs de la surface observée et de l'ombre portée selon la distance Z, perpendiculaire à la surface étudiée (fig. 4.10).

9. La présence du cylindre modifie la mesure issue du capteur, il est nécessaire de corriger cet impact.

10. La position de l'albédomètre est fonction de la rugosité de la surface. La WMO recommande de le positionner à une hauteur de 1 m à 2 m pour une surface uniforme couverte d'herbe rase.

Considérant la complexité des surfaces étudiées, et dans le but d'obtenir un outil d'aide à la décision, un code générique a été créé sous MATLAB. Il se compose de divers modules (dont le calcul des angles solides par triangulation sphérique) gérés par une fonction principale. Un fichier d'option permet de d'indiquer les entrées nécessaires, telles que les coordonnées des n points de la surface étudiée, les m points de l'ombre portée – ou de toute autre surface – (avec $\{n, m\} \in [3; +\infty]$). Sont également définies les coordonnées de l'albédomètre ainsi que trois points, l'un servant de repère pour l'orientation du pyranomètre et les deux autres utilisés comme témoins directionnels pour le positionnement du cylindre sur site (Cf. figure 4.13). Enfin, sont accessibles les bornes de la plage testée ainsi que le pas de discrétisation (constant ou adaptatif).

Le code produit un fichier de journalisation contenant notamment la distance Z optimale obtenue (considérant le pas de discrétisation choisi) et la répartition des angles solides par rapport aux surfaces définies. Un graphique représentant les résultats principaux issus de l'optimisation est également créé. Un exemple brut est présenté par la figure 4.11, pour une discrétisation constante. À noter que zéro correspond à l'altitude du pyranomètre indiquée (valeur négative, car initiée à partir de la surface de la paroi considérée).

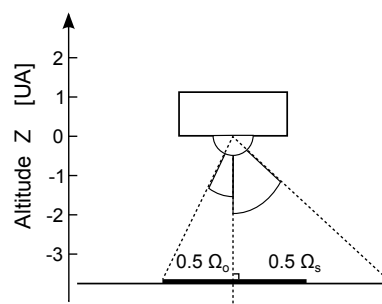


Figure 4.10 – Angles solides issus du pyranomètre.

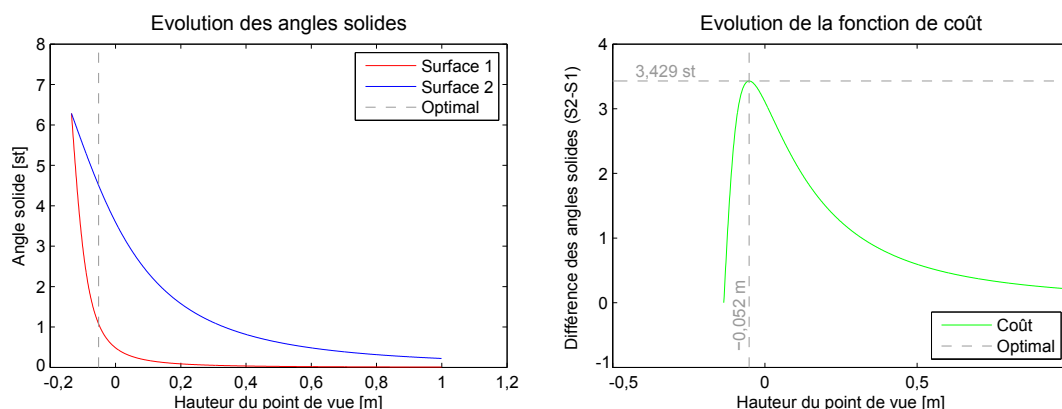


Figure 4.11 – Optimisation de la hauteur de l'albédomètre sur l'ISOTEST 1 sur $[-0,14; 1,00]$ m.

À noter que cette optimisation fonctionne pour tout type de surface ayant des angles inférieurs à 180° , quel que soit leurs positions ou inclinaisons. De plus, l'ombre portée est considérée fixe, ce qui n'est bien sûr pas le cas, compte tenu des évolutions circadiennes et saisonnières. Cette approximation est utilisée, car elle permet de se positionner dans le cas le plus défavorable, limitant ainsi de manière drastique la durée de l'optimisation.

4.2.2.3 Impact de l'ombre portée

La proximité de l'albédomètre avec la surface de la toiture induit une forte ombre portée lorsque les rayons solaires sont perpendiculaires à la PCV. Selon la simulation effectuée, cette situation apparaît uniquement du 17 septembre au 28 mars, soit pendant six mois de l'année. L'impact de l'ombre portée sur la mesure est fonction de sa taille, mais surtout de sa position. En effet, l'impact de celle-ci est pondéré lors de sa projection sur le champ de vision du pyranomètre. Considérant le caractère évolutif et non linéaire du système étudié, un module de calcul a été créé à cet effet. Basé sur les descriptions géométriques et géographiques, l'ombre portée est finement discrétisée afin d'obtenir l'impact sur la mesure à chaque pas de temps (Fig. 4.12). Il ressort des simulations effectuées que durant la journée représentant le cas le plus défavorable, l'impact de l'ombre portée évolue sur $[0; 20, 4] \%$ avec une moyenne journalière à $8,2 \%$. Toutefois, dans le but

d'obtenir le flux réfléchi par la canopée il est nécessaire de considérer l'impact de l'ombre portée, mais également la réflectivité de la canopée au spectre solaire. Hors, selon LAZZARIN et al. [2005] celle-ci est de l'ordre de 23% pour une PCV. Ainsi, dans le cas le plus défavorable, l'erreur de mesure associée à la réflectivité de la PCV due à l'ombre portée évolue sur $[0; 5] \%$, avec une moyenne de l'ordre de 2%. Par conséquent, dans une première approche, l'ombre portée peut être négligée.

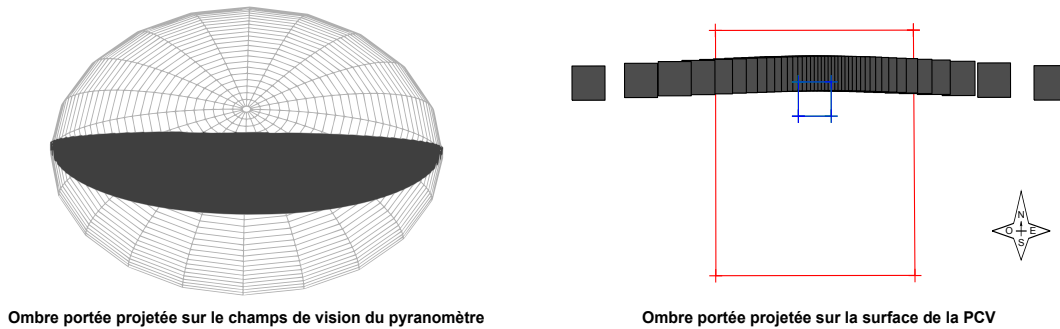


Figure 4.12 – Ombre portée du pyranomètre au cours de la journée du 28 juin.

Dans une approche plus fine, il est possible de compenser le résultat afin de minimiser l'impact de l'ombre sur la mesure. Effectuée *via* une étape de post-traitement, cette minimisation est basée sur un bilan radiatif associé à la modélisation de l'ombre portée.

4.2.3 Les cylindres

4.2.3.1 Conception des cylindres

— Code de calcul —

Les cylindres nécessaires sont directement corrélés aux positions des albedomètres et aux surfaces étudiées (donc aux surfaces à occulter). Afin d'obtenir les informations nécessaires à leurs conceptions, un programme a été créé sous MATLAB. Il est développé sous forme de module et couplé au programme d'optimisation des angles solides défini précédemment. Ainsi, à partir des données issues de ce module et des options graphiques souhaitées, le patron (plan) associé au cylindre est généré. À titre d'exemple, la figure 4.13 présente le patron généré (brut) pour le cylindre de protection associé à l'angle solide désiré pour l'ISOTEST 1.

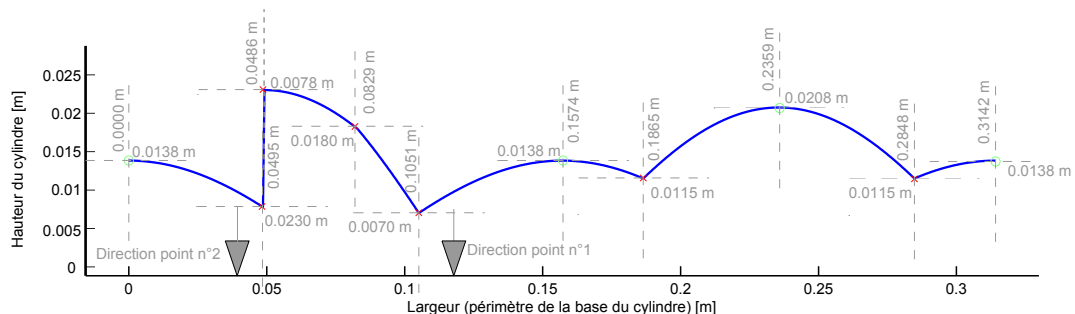


Figure 4.13 – Patron du cylindre de protection pour l'ISOTEST 1.

— Création du cylindre —

Les pyranomètres composant l'abédomètre ayant comme élément sensible une thermopile, il est important que le cylindre n'impacte pas la mesure, *i.e.* : que les échanges radiatifs entre le cylindre et le pyranomètre puissent être approximatifs nuls. Pour ce faire, le cylindre est composé d'une feuille d'aluminium de 0,5 mm d'épaisseur (forte effusivité, forte réflectivité), dont la face interne est peinte en noir mat (faible réflectivité). Positionné de manière concentrique au pyranomètre, le cylindre possède un rayon supérieur de 2 cm afin de permettre une évacuation par convection de la chaleur emmagasinée. La figure 4.14 présente un pyranomètre dont le champ de vision est limité par un cylindre de protection.



Figure 4.14 – Création des cylindres de protection

Enfin, dans l'idéal la découpe du cylindre s'effectue par CAO ; À défaut elle a été faite à la main avec une attention toute particulière vis-à-vis de la précision¹¹. L'influence sur l'angle solide observé, d'une erreur de découpe à ± 1 mm (± 5 mm), est indiquée dans le journal issu du code de calcul. Ces erreurs sont non symétriques. Dans le cas de l'ISOTEST 1, elles valent respectivement 2,51% et -2,68% (11,82% et -14,43%).

4.2.3.2 Impact du cylindre

— Facteur de correction —

L'utilisation du cylindre permet de réduire le champ de vision afin d'accéder à la mesure de l'irradiation de la surface souhaitée. Cependant, la présence de ce dernier induit une erreur de mesure. En effet, l'élément sensible du pyranomètre étant une thermopile, le flux radiatif observé produit une différence de potentiel en sortie du capteur. Cette variation est considérée linéairement proportionnelle¹² à l'intensité du transfert radiatif. Par conséquent, le cylindre limitant le flux radiatif il diminue la différence de potentiel, faussant dès lors la mesure.

Afin de corriger cette erreur, un scalaire (F_c) indiquant le pourcentage de flux non reçu par le pyranomètre, dû à la présence du cylindre, est défini. Ce facteur de correction est calculé par un modèle intégré au sein du code de calcul créé (Eq. 4.2). Dans celui-ci, le cylindre est discrétisé selon l'angle de révolution ($[0; 2\pi]$) et selon la hauteur, respectivement par pas de $\alpha_i 10^{-2}$ mm et $2\pi 10^{-3}$ rad (soit des éléments ayant une longueur d'arc de 0,4 mm dans le cas de l'ISOTEST 1). L'équation suivante présente le modèle développé, dans laquelle les indices n et m_i correspondent respectivement au nombre d'éléments discrets selon la révolution (sur $[0; 2\pi]$) et selon la hauteur de chacun de ces éléments. Les variables Ω_i et α_i , quant à elles, correspondent aux angles solide et zénithal de l'élément i considéré (Cf. figure 4.15).

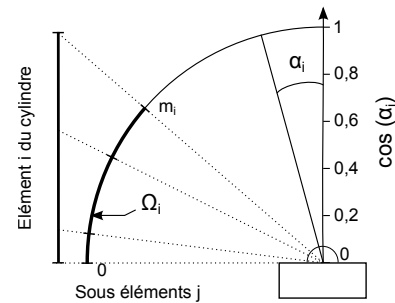


Figure 4.15 – Projection 2D de l'approche utilisée pour le calcul du facteur de correction (F_c).

$$F_c = \frac{100}{2\pi} \sum_{i=1}^{n-1} \left[\Omega_i \times \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} \cos \left(\frac{\alpha_{i+1} + \alpha_i}{2} \cdot \frac{j}{m_i} \right) \right] \quad (4.2)$$

— Erreur de découpe —

Une erreur de découpe du cylindre induit une erreur sur le facteur de correction qui se

11. La méthodologie de découpe développée spécifiquement à cet effet permet de justifier d'une erreur ± 1 mm.

12. Le coefficient de proportionnalité est défini par l'inverse de la sensibilité du capteur, exprimée en $\mu V.m^2.W^{-1}$.

répercute sur la mesure. Celles-ci sont calculées et indiquées dans le journal de bord en sortie de simulation. À l'instar des angles solides, ces erreurs sont non symétriques. Pour information, dans le cas de l'ISOTEST 1, une erreur de découpe du cylindre $\pm 1 \text{ mm}$ ($\pm 5 \text{ mm}$) engendre respectivement des erreurs relatives sur la mesure¹³ de 0,23% et -0,24% (1,27% et -0,98%).

Considérant les erreurs sur l'angle solide observé, mais surtout afin d'obtenir les facteurs de corrections réels, il est nécessaire de tester les cylindres en environnement contrôlé. Un banc d'essai a été conçu à cet effet.

4.2.4 Le banc d'essai

4.2.4.1 Cahier des charges

L'objectif principal¹⁴ du banc d'essai a été de caractériser l'impact du cylindre sur la mesure d'irradiance, dans le but d'acquérir le facteur de correction réel et de contrôler la qualité de la découpe effectuée.

Considérant ceci, il est alors nécessaire d'avoir une source d'irradiation d'intensité constante, homogène et isotrope sur 2π stéradian, dont la longueur d'onde est compatible avec les pyranomètres. Le banc d'essai doit permettre l'utilisation d'un cylindre de protection. Il doit également être instrumenté de manière à acquérir l'irradiation, mais aussi contrôler le champ thermique du système. Enfin, il est impératif que le mode opératoire choisi possède une bonne répétabilité en vue de permettre une comparaison entre les différentes campagnes de mesures effectuées.

4.2.4.2 Conception

— Source irradiante —

Les pyranomètres CMP6 et CMP11 possèdent une réponse linéaire sur la plage $[380; 2000] \text{ nm}$. Il est donc possible d'utiliser une source d'irradiation émettant dans l'infrarouge proche ou dans le visible. La source est composée de quatre spots halogènes ayant une température d'émission estimée à 2900 K . Considérant la loi de WIEN : $\lambda_{max} \approx 2,898.10^{-3}/T$, cette température correspond à une longueur d'onde principale de $1 \mu\text{m}$, la répartition du spectre énergétique associé est présentée par la figure 4.16.

Les spots étant des sources discrètes, ils sont positionnés à équidistance du pyranomètre et un collecteur est utilisé afin de favoriser une irradiation homogène et isotrope. Ce dernier est de forme sphérique et possédant une transmittance importante sur la plage $[380; 2000] \text{ nm}$ afin de maximiser la plage du spectre observé par le pyranomètre.

Considérant la linéarité de la réponse spectrale, l'étendue du spectre émis par l'éclairage et la difficulté d'obtention d'un dôme de diamètre 40 cm non opaque sur la plage $[380; 2000] \text{ nm}$, un dôme en verre dépoli¹⁵ de 4 mm d'épaisseur est utilisé. La finesse du dôme permet de limiter l'inertie thermique. De plus, sur les 4 mm le dôme est composé de $\sim 2 \text{ mm}$ de verre¹⁶ et de $\sim 2 \text{ mm}$ de vernis, permettant d'augmenter la réflectivité et donc le caractère lambertien du rayonnement observé. Avec un taux¹⁷ de transmission de 70% le flux thermique irradié dans le dôme est de l'ordre de 60 W.m^{-2} (selon le mode opératoire). La figure 4.17 présente le banc d'essais ainsi conçu.

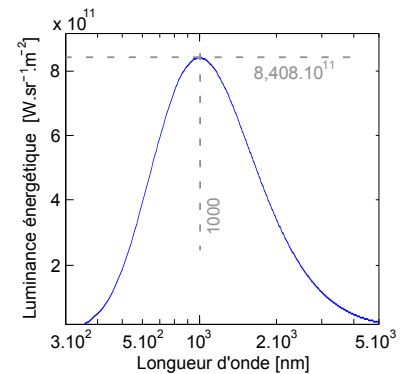


Figure 4.16 – Luminance de la source utilisée (loi de PLANCK).

13. Il est à noter que due à la position basse du cylindre, l'erreur de découpe est minimisée par le cosinus de l'angle d'incidence. Raison pour laquelle les erreurs associées aux angles solides sont plus importantes.

14. À noter que le banc d'essai permet également de vérifier et d'étalonner les pyranomètres à faible irradiation.

15. Le caractère dépoli induit une rugosité de surface assurant une diffusion du rayonnement dans le dôme, et donc une meilleure homogénéité d'irradiation, justifiant l'hypothèse d'une irradiation lambertienne.

16. Considérant l'épaisseur du verre (le vernis n'ayant pas d'action mécanique) et le poids du dôme, nous avons dû faire appel à un vitrier pour la découpe adéquate de l'encolure (afin que le pyranomètre puisse être positionné).

17. Taux obtenu expérimentalement.

— Chaîne d'acquisition —

La chaîne d'acquisition mise en place est composée d'une centrale d'acquisition (CR23X de CAMPBELL SCIENTIFIC), de thermocouples (type T) et d'un pyranomètre (CMP11 de KIPP & ZONEN). L'échantillonnage se fait à $0,1\text{ Hz}$. Les thermocouples sont uniquement présents afin de vérifier l'évolution thermique de l'air ambiant, du dôme, du pyranomètre, du cylindre et du bornier de la centrale. Ces données étant nécessaires à la caractérisation des phénomènes radiatifs présents.

Le pyranomètre quant à lui est positionné sur une plateforme de 100 cm^2 au centre du dôme (Fig. 4.17). *Nota* : dans le cas de la nécessité de comparaison de séquences de mesures successives, un second pyranomètre est constamment positionné au sol, à la verticale du dôme (donc au centre du banc).

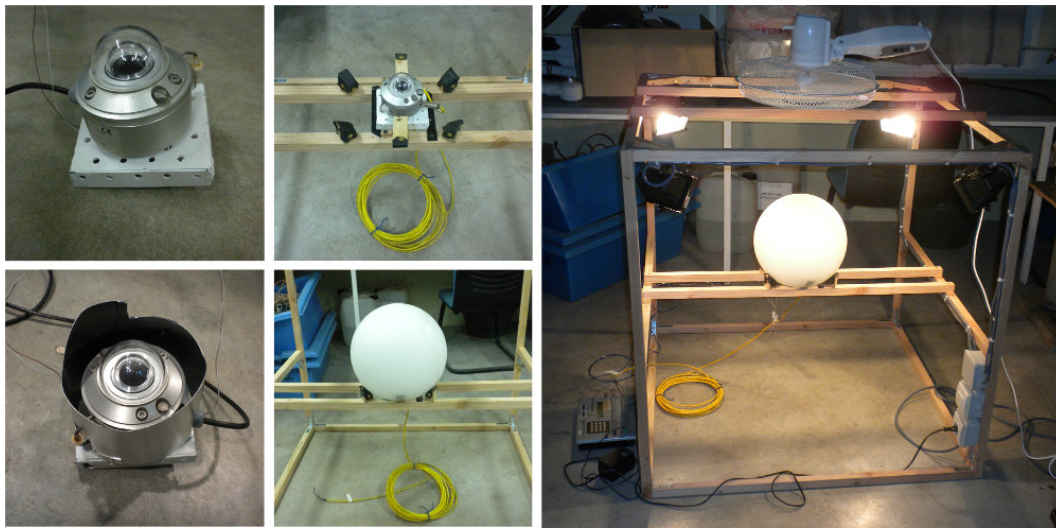


Figure 4.17 – Présentation du banc d'essai conçu.

4.2.4.3 Mode opératoire

— Choix du protocole —

Dans l'optique de permettre une vérification de l'impact du cylindre, il est nécessaire de comparer les mesures issues de deux campagnes successives (avec et sans cylindre). Mais ceci est possible, uniquement, si les régimes statiques sont atteints et si l'intensité du flux thermique arrivant sur le pyranomètre testé est identique durant ces deux campagnes.

Considérant le montage, deux types de campagnes sont possibles, elles sont caractérisées par leurs temps d'exécution : « court » ou « long ». Contrairement à la première approche (quelques minutes), la seconde approche (plusieurs heures) possède une accession difficile au régime stationnaire (hors chambre climatisée). Ceci, car, parmi les 30% du rayonnement non transmis par le globe, une partie du flux thermique est stockée dans le verre ; le globe s'échauffe alors et augmente peu à peu le phénomène de transfert radiatif avec le pyranomètre, perturbant ainsi la mesure.

Aux vues de ces considérations, le rayonnement issu des lampes est privilégié. Le protocole défini utilise donc l'approche « courte ». De plus, afin de permettre l'augmentation de la durée de la campagne, un ventilateur est utilisé améliorant ainsi la précision du résultat. Enfin, cette approche s'inscrit dans un ensemble de 10 cycles alternants les périodes avec et sans¹⁸ irradiation.

18. Permet de limiter la surchauffe du globe et ainsi éviter la production de rayonnement GLO perturbateur.

tion (respectivement 5 min puis 10 min). Ce protocole est dénommé¹⁹ « méthode flash récursive ».

— Contrôle de l'éclairage —

Le protocole défini nécessite une constance des durées composant les cycles. Afin de faciliter la mise en œuvre de ce dernier et ainsi limiter les risques d'erreur, l'éclairage est automatiquement piloté par la centrale d'acquisition. Pour ce faire, le programme d'acquisition a été développé en ce sens, intégrant une gestion temporelle de la sortie 12V sur laquelle est connectée une carte relais par laquelle passe l'alimentation (220V) des spots. À noter que cette carte a été spécifiquement créée²⁰ afin de répondre précisément à la tension et l'intensité de courant électrique délivrées par la centrale d'acquisition.

— Vérification de la répétabilité du protocole choisi —

La répétabilité est l'une des caractéristiques clefs du système mis en place. Il est impératif que cette condition soit vérifiée afin de permettre son utilisation.

Pour ce faire une séquence de mesure a été lancée durant 48h, soit 192 cycles. Il ressort de cette étude une irradiation moyenne de $85,19 \pm 0,28 \text{ W.m}^{-2}$. La principale source d'erreur étant la variation de l'intensité lumineuse due aux (faibles) variations des caractéristiques du réseau électrique. Celles-ci sont supprimées lors du traitement des données à l'aide du second pyranomètre.

Avec une erreur relative de 0,33% sur 48h, le protocole possède alors une bonne fidélité intermédiaire de mesure et donc une bonne répétabilité [JCGM, 2012].

4.2.5 Résultats

À partir de la modélisation développée, l'impact des cylindres sur la mesure a pu être prédit. Considérant les risques d'erreurs liés à la conception de ces derniers (Cf. section 4.2.3.1) il est nécessaire de vérifier la validité des facteurs de correction théoriques.

Les séquences expérimentales effectuées révèlent une très bonne adéquation entre les facteurs de correction théoriques et expérimentaux. En effet, l'erreur sur le flux observé par le pyranomètre est de l'ordre de $9.10^{-2} \text{ W.m}^{-2}$, soit 0,15% du flux perçu sans cylindre. Ces résultats confortent d'une part la méthodologie utilisée lors de la découpe, mais également (à minima) les codes développés à cet effet (*i.e.* : le calcul de l'angle solide, la description du patron) ainsi que le modèle de calcul du facteur de correction (eq. 4.2).

Enfin, les cylindres créés sont considérés comme correspondant aux attentes. Les pyranomètres et leurs cylindres respectifs sont alors positionnés en toiture où leurs propriétés protectrices ont pu être vérifiées²¹.

4.2.6 Synthèse

Dans le but de pouvoir obtenir la mesure de l'albédo sur les toitures (faibles superficies), il a été nécessaire d'optimiser la position des capteurs et d'adapter leurs champs de vision (*via* un cylindre « découpé »). Basée sur des considérations géométriques 3D liées aux conditions d'exploitation de l'albédomètre, la modélisation développée a permis d'obtenir la position optimale des albédomètres, la description ainsi que les plans de conceptions des cylindres nécessaires. À partir de ces données, l'impact des cylindres sur la mesure a pu être prédit.

Afin de vérifier l'impact des cylindres un banc d'essai a été conçu et le protocole associé défini. Enfin, les prédictions théoriques ont été confortées par les résultats expérimentaux (très faible erreur) permettant la mise en œuvre des albédomètres.

19. Nom issu de la similarité entre la méthode proposée et celle utilisée pour l'obtention de l'effusivité thermique.

20. Nota : la carte relais intègre un optocoupleur afin d'isoler la centrale, supprimant les risques de surtension.

21. Pour ce faire, l'albédomètre a été éclairé depuis le périmètre de la zone à observer, ne détectant pas de rayonnement direct.

Section 5

Analyse des séquences Expérimentales

Dans l'optique de pouvoir caractériser les performances thermiques des PCV testées (*i.e.* PCV_{ce}^{Te} , PCV_{ce}^{Th} et PCV_{Lsa}^{Th}) il est nécessaire de sélectionner une séquence expérimentale adéquate. La présente section présente la période de mesure choisie ainsi que les résultats bruts obtenus (impact des solutions techniques sur les températures et les densités de flux thermiques ; analyse comparative entre ces diverses solutions).

L'exploitation des résultats *via* des indicateurs spécifiques sera effectuée dans la section suivante.

5.1 Les périodes de mesures

Le choix de la période de mesure est basé sur les conditions climatiques observées. Il s'avère que La Réunion possède deux saisons : l'une dite « saison sèche » (mai à octobre), où prédomine un courant d'alizés plutôt froid et sec et l'autre dite « saison des pluies » (novembre à avril) plus chaude et plus humide avec des vents d'intensité moindre dont la direction est plus fluctuante. Durant cette période l'île est sujette aux perturbations cycloniques. D'un point de vue local, sur la plateforme expérimentale, il est possible de définir trois journées type :

- *JT1* : définit une journée estivale, caractérisée par un fort ensoleillement, pouvant atteindre 1000 W.m^{-2} et un vent faible ;
- *JT2* : représente une journée hivernale ventée, combinant un faible ensoleillement et un vent de vitesse soutenue ;
- *JT3* : symbolise une journée hivernale non ventée, avec un ensoleillement moins intense et une faible vitesse de vent.

Dans le but de répondre à la problématique, seule la journée type *JT1* est nécessaire. En effet, celle-ci permet d'observer la PCV dans les conditions les plus défavorables ; conditions idéales pour caractériser leur comportement en climat tropical humide. Plus spécifiquement, il est nécessaire d'obtenir une période, assez longue afin d'être représentative, qui possède un fort ensoleillement, une faible vitesse de vent et une humidité relative non saturée.

Considérant ces besoins, la séquence expérimentale choisie s'étend du 13 au 24 octobre 2014, soit du jour julien 286 au 297. À noter que la durée de la séquence (11 jours) est choisie pour des raisons de visibilité graphique. La période globale de l'expérimentation débute en décembre 2013, elle est toujours active en décembre 2015. Considérant la croissance des plantes, les données exploitables débutent en juin 2014 ; elles sont à considérer au regard de l'évolution de la canopée : la saisonnalité et les conditions phytosanitaires affectent le LAI et la transmissivité.

Les courbes associées aux sollicitations météorologiques sont présentées par les figures 5.1, 5.3, 5.4 et 5.2. Les données statistiques associées aux valeurs moyennes circadiennes sont quant à elles présentées par le tableau 5.1.

Table 5.1 – Sollicitations météorologiques circadiennes moyennes durant la séquence expérimentale

Grandeur	Globale	Diurne	Nocturne	Maximum	Unité
Humidité Relative	$70,2 \pm 3,0$	$66,2 \pm 3,8$	$74,8 \pm 3,3$	$81,9 \pm 3,2$	%
Température d'air	$24,2 \pm 0,6$	$26,1 \pm 0,6$	$22,1 \pm 0,6$	$28,3 \pm 0,8$	$^{\circ}C$
Irradiation globale	$270,3 \pm 42,7$	$508,0 \pm 78,8$	$0,0 \pm 0,0$	$1235,3 \pm 113,6$	$W.m^{-2}$
Irradiation directe	$191,9 \pm 56,8$	$360,6 \pm 105,8$	$0,0 \pm 0,0$	$919,7 \pm 75,0$	$W.m^{-2}$
Irradiation diffuse	$78,4 \pm 16,0$	$147,4 \pm 30,2$	$0,0 \pm 0,0$	$426,8 \pm 72,8$	$W.m^{-2}$
Vitesse du vent (2m)	$1,2 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,4$	$m.s^{-1}$
Direction du vent (2m)	$151,3 \pm 38,8$	$157,4 \pm 41,4$	$144,9 \pm 39,3$	/	$^{\circ} \in [0; 360[$
Précipitation	0 ± 0	/	/	/	$m^3.m^{-2}$

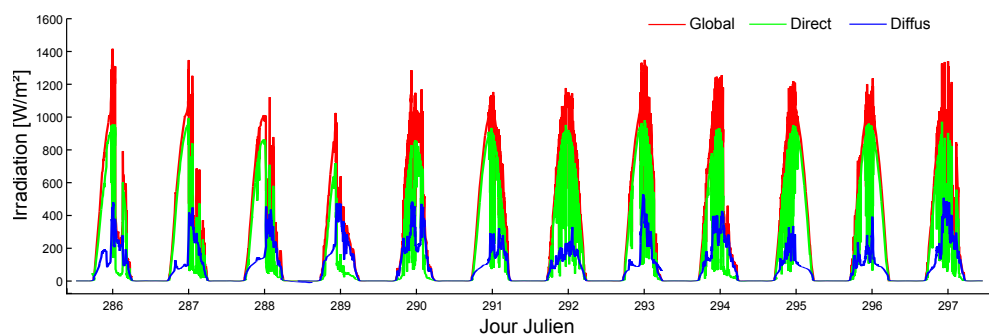


Figure 5.1 – Évolution de l'irradiation solaire durant la séquence expérimentale

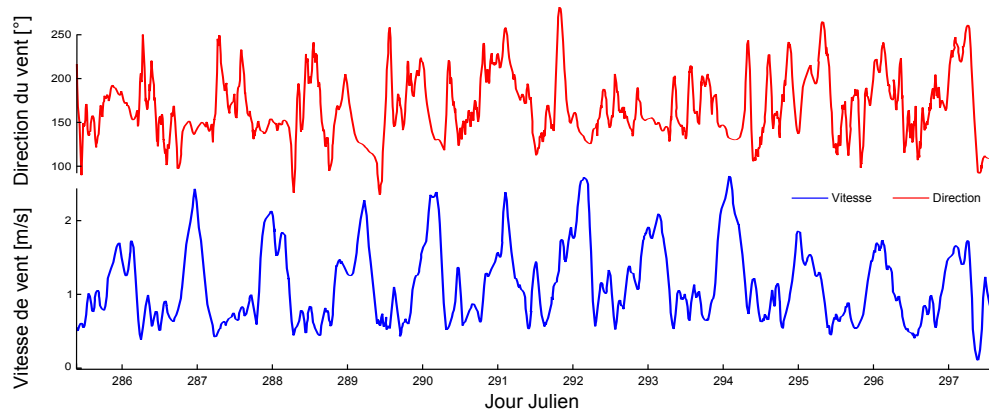


Figure 5.2 – Évolution de la vitesse et de la direction du vent à 2 m durant la séquence expérimentale

Il apparaît que la période sélectionnée possède une grande homogénéité quant aux sollicitations. De plus, l'humidité relative n'est jamais à saturation (moyenne à $70,2 \pm 3,0\%$ et le vent

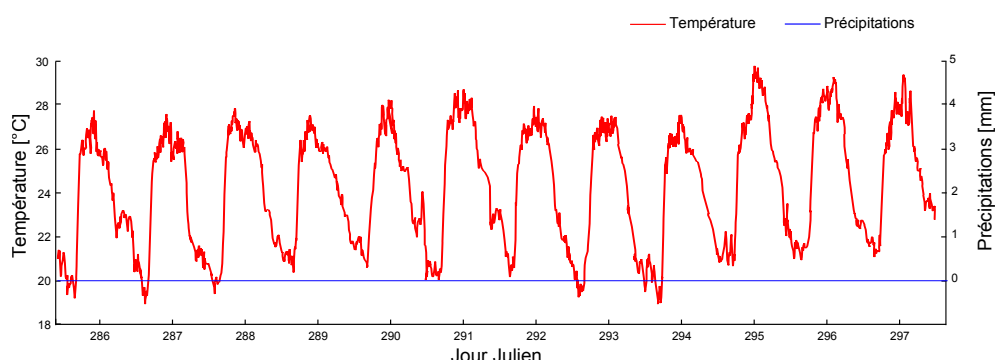


Figure 5.3 – Évolution de la température d'air et des précipitations durant la séquence expérimentale

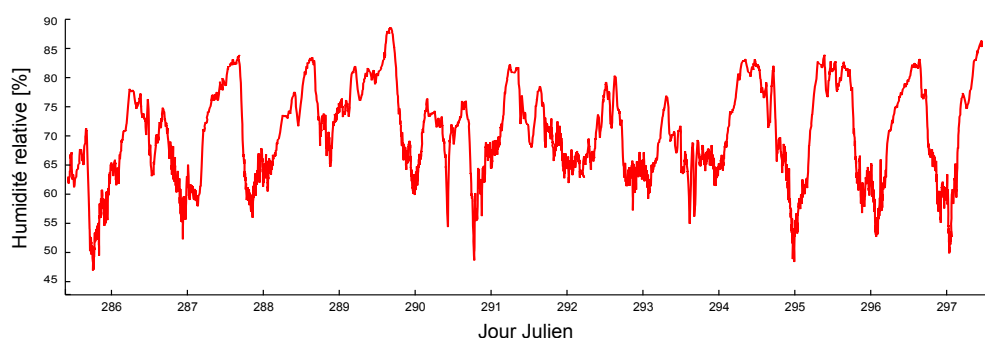


Figure 5.4 – Évolution de l'humidité relative durant la séquence expérimentale

est faible de jour comme de nuit (moyenne diurne à $1,5 \pm 0,2 m.s^{-1}$). Enfin, l'irradiation globale est importante (moyenne à $508,0 \pm 78,8 W.m^{-2}$), dont la majorité est constituée de rayonnement direct (58%).

5.2 Observations sur bacs végétalisés

Actuellement, la grande majorité, des PCV installées dans le monde sont de type classique extensif (PCV_{ce}) positionnées sur des structures lourdes (béton). Afin d'estimer l'impact de ce type de paroi à La Réunion, une expérimentation a été mise en place (Cf. sections 2.2.1 et 1.3.1). Elle consiste en deux bacs positionnés en environnement naturel, respectivement avec et sans végétation, afin de déterminer l'influence de celle-ci sur les évolutions du flux thermique et du champ de température. La figure 5.5 illustre le montage.

— Retour d'expérience —

Initialement non irrigué et soumis aux intenses sollicitations météorologiques, le gazon des Mascareignes a rapidement commencé à dépérir. Il s'avère que la forte perméabilité et la faible rétention en eau du substrat associées à de faibles précipitations induisant un stress hydrique non adéquat à l'expérimentation (puisque limitant la transpiration, donc la capacité d'isolation de la PCV). De ce fait, la couche de terreau (présentée tab. 1.3) a été ajoutée et l'irrigation installée (sprinklers – 1h matin et soir).

— Résultats —

Les données acquises au cours de la séquence expérimentale (températures et flux) permettent d'obtenir l'évolution du champ thermique dans les échantillons testés (figures 5.6 et 5.7) ainsi que leurs comparaisons sommaires. À cette fin, les données statistiques associées sont présentées

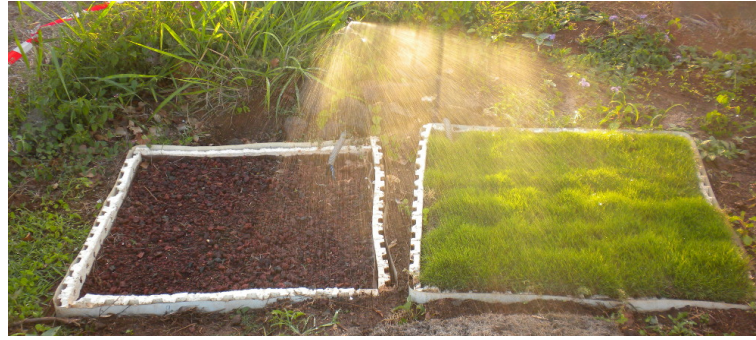


Figure 5.5 – Arrosage automatique sur les bacs végétalisés ($PCV_{ce}^{T_e}$) en fin de journée.

par le tableau 5.2.

L'évolution du champ thermique au sein du substrat, présenté par la figure 5.6, permet d'observer l'impact de la végétation sur la température : le gradient¹ et l'amplitude² sont considérablement diminués (respectivement par un facteur moyen de 5,3 et 3,6), le déphasage au sein des couches du même échantillon est également impacté. Il apparaît de plus l'impact de l'arrosage à 7 heures et 19 heures. Celui-ci est aussi visible sur les graphiques de la figure 5.7. Le transfert de masse influe sur le champ thermique, homogénéisant ce dernier, faisant localement perdre ou gagner de l'énergie selon la température du fluide comparativement au milieu. L'irrigation influe donc sur la cinétique du champ thermique, et ceci proportionnellement au gradient de température présent au sein du complexe poreux.

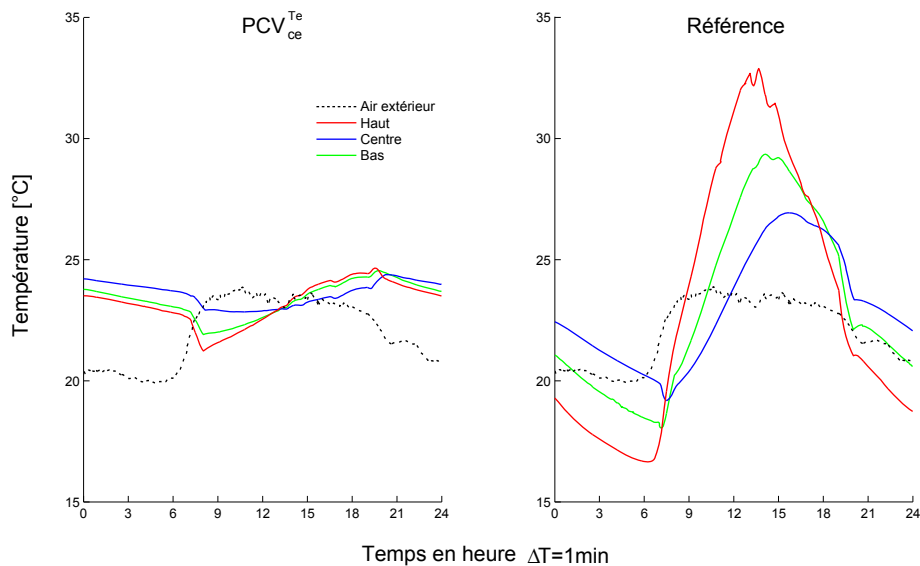


Figure 5.6 – Évolution du champ thermique au sein du substrat au cours de la journée.

Il ressort que la $PCV_{ce}^{T_e}$ transmet un flux moyen de $0,05 \text{ W.m}^{-2}$ contre $6,22 \text{ W.m}^{-2}$ pour le témoin, et avec une amplitude circadienne plus faible d'un facteur 3,1. La température en face interne du substrat, quant à elle, est en moyenne similaire, toutefois l'amplitude circadienne est plus faible d'un facteur 4,0. Enfin, la $PCV_{ce}^{T_e}$ possède en moyenne un déphasage supplémentaire de $6\text{h} \pm 50\text{min}$ (variation selon les sollicitations climatiques).

1. $PCV_{ce}^{T_e}$ et témoin possèdent un gradient circadien maximal moyen de $1,7 \pm 0,7^\circ\text{C}$ et $8,9 \pm 1,1^\circ\text{C}$, respectivement.

2. $PCV_{ce}^{T_e}$ et témoin possèdent une amplitude circadienne moyenne de $4,6 \pm 1,4^\circ\text{C}$ et $16,9 \pm 2,1^\circ\text{C}$ en surface de substrat, ainsi qu'une amplitude de $2,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ et $8,1 \pm 1,0^\circ\text{C}$ sous le substrat. Soit une réduction moyenne d'amplitude dans le substrat de 3,6.

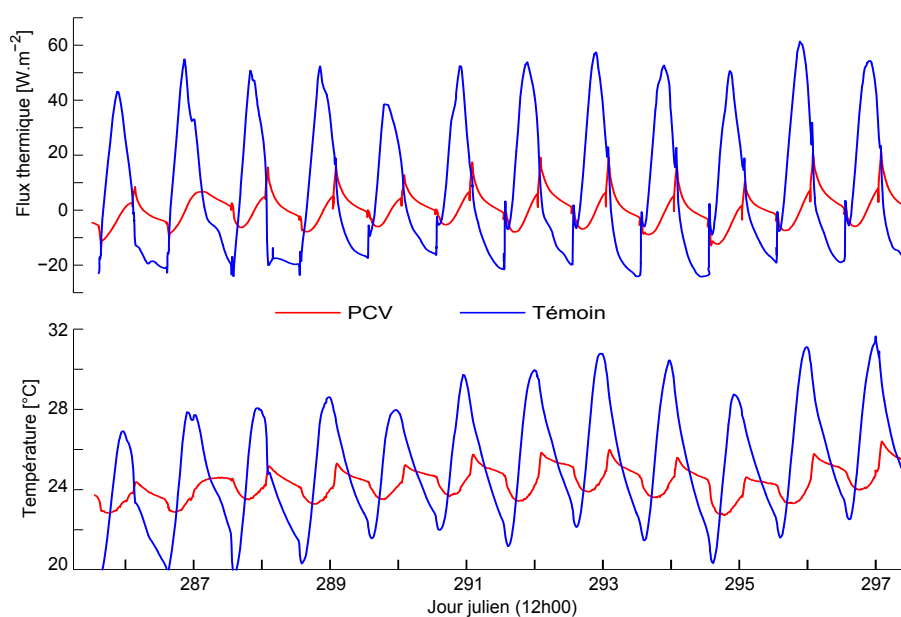


Figure 5.7 – Évolution des températures et flux associés sous le substrat.

Table 5.2 – Principales données statistiques circadiennes issues des mesures sous le substrat ($PCV_{ce}^{T_e}$).

	Températures* [°C]		Densités de flux [W.m ⁻²]	
	Moyenne	Amplitude	Moyenne	Amplitude
$PCV_{ce}^{T_e}$	24,3 ± 0,4	2,0 ± 0,5	0,1 ± 1,9	22,9 ± 3,8
Témoin (substrat)	24,9 ± 1,1	8,0 ± 1,1	6,2 ± 3,3	71,1 ± 8,7

* : La température correspond à T_b , la température sous le substrat.

L'évolution des températures et la réduction des flux sont corroborées par les études de LIU et BASKARAN [2004] en climat continental (été) et par celles de JIM et PENG [2012] en climat tropical humide. De plus, l'impact de l'irrigation sur le flux thermique en matinée (pertes, Cf. figure 5.7) est également observé par JIM et HE [2010] lors des jours pluvieux, toutefois les gains en soirée n'ont pas été observés. Ceci provient certainement des conditions expérimentales. En effet, dans notre étude l'arrosage du soir correspond à un substrat dont la surface externe est l'interface qui possède une plus forte enthalpie ; l'eau s'infiltrant transporte alors une partie de cette énergie sous le substrat, favorisant le transfert thermique avec la structure (gain). À l'inverse, le matin la surface du substrat possède l'enthalpie la plus faible, la température de l'eau traversant le milieu est alors inférieure à celle sous le substrat lorsqu'elle y parvient, favorisant ainsi un transfert thermique négatif (pertes). Dans l'expérimentation de JIM et HE, les précipitations importantes associées à une faible irradiation (journée pluvieuse) induisent un substrat dont la surface externe possède la plus faible enthalpie, favorisant ainsi les pertes thermiques. Considérant les conditions météorologiques et la conception de la PCV, le gain aurait certainement été observable lors d'un épisode pluviométrique léger (court) après une chaude journée (cas non présenté).

5.3 Observations sur modules ISOTEST

5.3.1 Résultats de la $PCV_{ce}^{T_h}$

En matière de bâti, le parc réunionnais possède une spécificité architecturale notable : une grande partie des toitures est constituée de tôles galvanisées sur une structure légère dont la pente avoisine les 24° .

Afin de tester l'impact d'une $PCV_{ce}^{T_e}$ sur ce type de toiture (donc une $PCV_{ce}^{T_h}$) une seconde expérimentation a été mise en place. Explicitée dans la section 2.2.2, celle-ci est illustrée par la figure 5.10. Il s'agit de tester les configurations des échantillons expérimentés dans les bacs végétalisés sur la toiture d'un bâti à échelle 1/3.

— Retour d'expérience —

Tout comme pour l'expérimentation précédente, malgré une irrigation biquotidienne de 60 minutes (sprinkleur), une couche de terreau a dû être introduite sous le gazon des Mascareignes. En effet, sans celle-ci, la teneur en eau disponible pour le gazon était insuffisante, amenant ce dernier à dépérir³. Les conditions lui étant dès lors favorables, le gazon s'est fortement développé. Les racines ont atteint la tôle, traversant les 45 mm de terreau amendé⁴ et les 80 mm de scorie, assurant son adéquation au milieu. Autre témoin de cette adéquation, l'irrigation et l'amendement ont conduit le gazon à une croissance bien supérieure à celle annoncée, passant de 3 cm à 13 cm en 2 mois au lieu des 2 cm annuel prévus. Cet impondérable contraignant à tailler régulièrement le gazon, afin de permettre une mesure correcte par l'albédomètre installé (dont la position avait été définie considérant une hauteur de gazon fixe).

— Résultats —

Les données acquises au cours de la séquence expérimentale (températures et flux) permettent d'obtenir l'évolution du champ thermique dans les échantillons testés (figures 5.8 et 5.9) ainsi que leurs comparaisons sommaires. À cette fin, les données statistiques associées sont présentées par le tableau 5.3.

Table 5.3 – Principales données statistiques circadiennes mesurées au contact de la tôle ($PCV_{ce}^{T_h}$)

	Températures* [°C]		Densités de flux [W.m ⁻²]	
	Moyenne	Amplitude	Moyenne	Amplitude
$PCV_{ce}^{T_h}$	24,7 ± 0,9	5,3 ± 0,8	-0,2 ± 0,2	2,9 ± 0,3
Substrat	27,4 ± 1,3	15,0 ± 2,0	1,1 ± 0,4	10,2 ± 1,6
Témoin (Tôle)	31,5 ± 1,8	48,7 ± 3,7	2,1 ± 0,3	42,0 ± 6,1

* : La température correspond à T_t , la température de la tôle.

L'évolution du champ thermique au sein du substrat, présenté par la figure 5.8, permet d'observer des impacts similaires à ceux observés pour la $PCV_{ce}^{T_e}$: le gradient⁵ et l'amplitude⁶ sont considérablement diminués (respectivement par un facteur moyen de 6,6 et 4,1), le déphasage au sein des couches du même échantillon est également impacté. De plus, à l'instar des bacs végétalisés, l'impact de l'arrosage à 7 heures et 19 heures est notable (seul la $PCV_{ce}^{T_h}$ est arrosée). Toutefois, comparativement à la $PCV_{ce}^{T_e}$, l'impact sur le flux⁷ et sur la température de tôle est de

3. Sans terreau le *Zosia tenuifolia* dépérit en 30 jours (intersaison) malgré une irrigation biquotidienne.

4. L'amendement consiste en un apport en azote ($N = 160 \text{ g.m}^{-3}$) et en phosphate ($P_2O_3 = 80 \text{ g.m}^{-3}$).

5. $PCV_{ce}^{T_h}$ et témoin (substrat) possèdent un gradient circadien maximal moyen de $1,2 \pm 0,2^\circ\text{C}$ et $7,9 \pm 1,0^\circ\text{C}$, respectivement.

6. $PCV_{ce}^{T_h}$ et témoin (substrat) possèdent une amplitude circadienne moyenne de $5,1 \pm 1,0^\circ\text{C}$ et $25,6 \pm 3,5^\circ\text{C}$ en surface de substrat, ainsi qu'une amplitude de $5,5 \pm 1,0^\circ\text{C}$ et $18,0 \pm 2,6^\circ\text{C}$ sous le substrat. Soit une réduction moyenne d'amplitude dans le substrat de 4,1.

7. À noter que l'aspect de la courbe de flux associé à la $PCV_{ce}^{T_h}$ (fig. 5.9) s'apparente à la charge/décharge

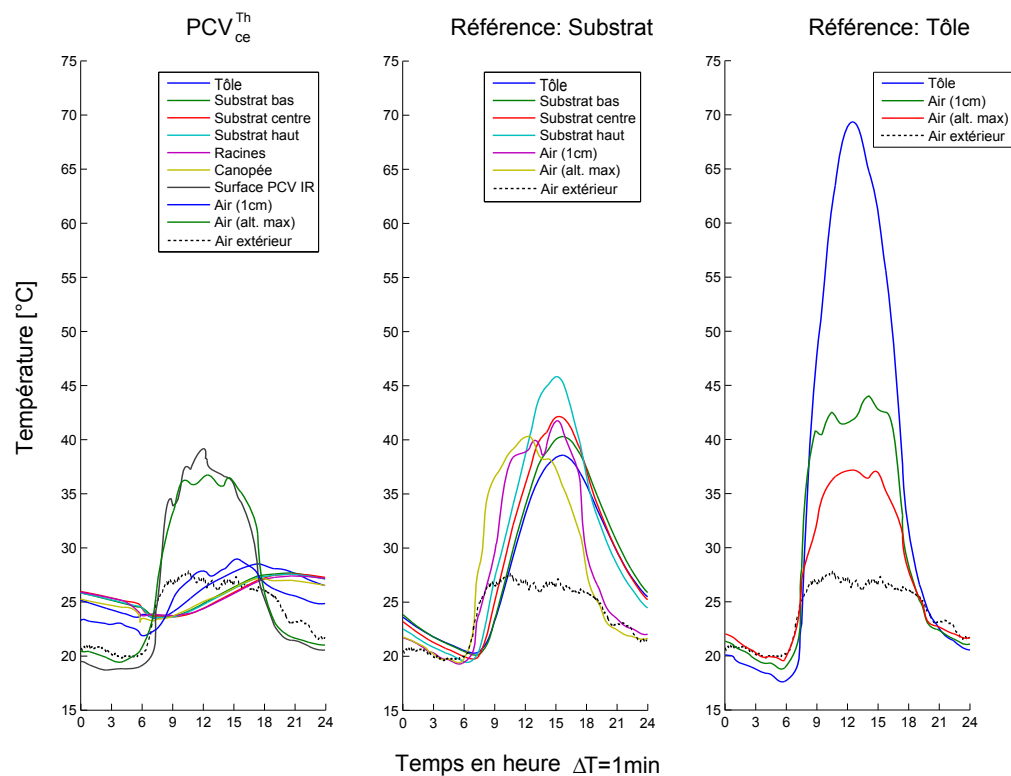


Figure 5.8 – Évolution du champ thermique au sein des échantillons au cours de la journée (PCV_{ce}^{Th}).

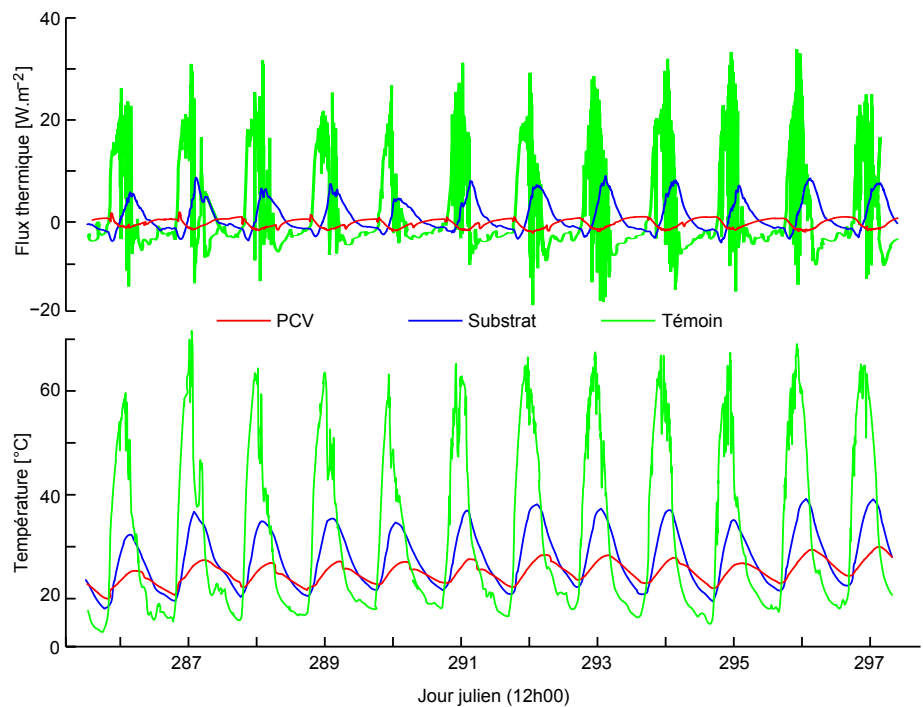


Figure 5.9 – Évolution des températures et flux au contact de la tôle.



Figure 5.10 – Les ISOTEST utilisées pour l'étude de la $PCV_{ce}^{T_h}$.

moindre importance, alors que celui sur les températures du complexe {végétation+substrat} est plus prononcé. Cette différence provient de la pente associée à l'évacuation du percolat. Cette caractéristique supprime le stockage hydrique gravitaire, réduisant ainsi l'eau dans la partie inférieure du substrat et donc l'inertie thermique.

À noter que le lien entre la pente de la toiture et la température de surface n'est pas évident. En effet, bien que l'orientation de la $PCV_{ce}^{T_h}$ induise une plus grande densité de flux solaire (+8,7% au midi solaire), la température de la végétation reste très proche de celle de la $PCV_{ce}^{T_e}$ (hors irrigation).

Par ailleurs le faible gradient observé pour la $PCV_{ce}^{T_h}$ induit une forte résistance thermique dès la surface de la canopée, car dans le cas contraire le gradient se rapprocherait de celui présent dans le substrat de la toiture témoin. Cette remarque est confortée par le fait que la température de la canopée est toujours plus basse que celle de l'air extérieur. Ceci s'explique par le phénomène d'évaporation de l'eau interceptée par les feuilles, ainsi que par le phénomène de transpiration. Plus généralement, l'évapotranspiration⁸ est un processus endothermique qui réduit localement l'énergie sensible. Il a pour conséquence de supprimer les intrants et possiblement d'inverser le sens du transfert de chaleur. En effet, à l'instar d'une pompe à chaleur, la $PCV_{ce}^{T_h}$ tend à refroidir l'ISOTEST comme l'illustre le flux négatif présenté par le tableau 5.3.

Cette perte de flux due à l'eau dans le substrat est corroborée par CONNELLY et LIU [2005] et surtout par JIM et TSANG [2011a], qui lient cette perte aux variations météorologiques saisonnières et journalières ; pour lesquelles l'irradiation solaire et l'humidité relative sont les facteurs clefs.

De plus, il ressort que la température de tôle, se rapprochant de la température de l'air extérieur, est (quasiment) toujours plus élevée que celle de la canopée. Ceci traduit un effet de bord. En effet, les faibles portions non recouvertes par le substrat (fig. 5.10) sont soumises aux sollicitations météorologiques. Considérant l'état de surface (peint en blanc brillant afin d'augmenter l'albédo), l'origine de l'effet est principalement due à la forte effusivité de la tôle en contact direct avec l'air extérieur (transfert convectif), ainsi qu'à l'irradiation.

Plus globalement, il apparaît que la $PCV_{ce}^{T_h}$ induit un flux moyen de $-0,21 \text{ W.m}^{-2}$ contre $1,05 \text{ W.m}^{-2}$ et $2,07 \text{ W.m}^{-2}$ pour les témoins (substrat et tôle), dont l'amplitude circadienne est plus faible d'un facteur 3,5 et 14,4, respectivement. La température de la tôle (face interne du substrat), quant à elle, est également réduite. En moyenne, pour ces témoins, la réduction est de $2,7^\circ\text{C}$ et $6,9^\circ\text{C}$, pour une amplitude circadienne diminuée d'un facteur 2,8 et 9,2. Enfin, la $PCV_{ce}^{T_h}$ et le substrat possèdent en moyenne un déphasage thermique de $3\text{h} \pm 40\text{min}$ et $6\text{h} \pm 48\text{min}$ (variation selon les sollicitations climatiques).

5.3.2 Résultats de la $PCV_{Lsa}^{T_h}$

Dans le but d'obtenir une solution plus adaptée aux besoins (*i.e.* : tôle sur structure légère), une troisième approche a été développée. Explicitée section 2.2.3 la $PCV_{ce}^{T_h}$ est remplacée par

d'un condensateur. En ce sens, la charge est provoquée par les sollicitations (irradiation principalement) et la décharge par l'irrigation en fin de journée.

8. Considérant l'irrigation (substrat saturé à 6h et 18h), et dans des conditions thermiques et hygriques favorables.

une $PCV_{L_{sa}}^{T_h}$ ou plus exactement une PCV_{StAVg}^{24} . Celle-ci est illustrée par la figure 5.11.

Nota : les lianes possèdent une irrigation biquotidienne de 60 minutes (goute-à-goute). De plus, celles-ci étant plantées dans des pots pour les besoins de l'expérimentation, une attention particulière a été nécessaire pour leurs besoins (amendements, *etc.*).



Figure 5.11 – Les ISOTEST : impact d'une PCV de type ligneux ($PCV_{L_{sa}}^{T_h}$).

— Résultats —

Les données acquises au cours de la séquence expérimentale (températures et flux) permettent d'obtenir l'évolution du champ thermique dans les échantillons testés (figures 5.12 et 5.13) ainsi que leurs comparaisons sommaires. À cette fin, les données statistiques associées sont présentées dans le tableau 5.4.

Table 5.4 – Principales données statistiques circadiennes mesurées au contact de la tôle ($PCV_{L_{sa}}^{T_h}$)

	Températures* [°C]		Densités de flux [$W.m^{-2}$]	
	Moyenne	Amplitude	Moyenne	Amplitude
$PCV_{L_{sa}}^{T_h}$	$26,1 \pm 1,0$	$17,2 \pm 1,5$	$-0,6 \pm 0,2$	$12,5 \pm 1,4$
Témoin (tôle)	$31,5 \pm 1,7$	$48,7 \pm 3,7$	$2,1 \pm 0,3$	$42,0 \pm 6,1$

* : La température correspond à T_t , la température de la tôle.

Le traitement des données obtenues permet de caractériser le comportement de la PCV durant cette période (Tab. 5.4). Il apparaît que la $PCV_{L_{sa}}^{T_h}$ est le siège d'un flux moyen négatif $-0,57 W.m^{-2}$ contre $2,07 W.m^{-2}$ pour le témoin ; l'amplitude circadienne associée est plus faible d'un facteur 3,4. La température de tôle est quant à elle, réduite en moyenne de $5,5^{\circ}C$ (soit 17%) et son amplitude circadienne est plus faible d'un facteur 2,8. Enfin, la $PCV_{L_{sa}}^{T_h}$ possède un déphasage thermique moyen de $1h \pm 39min$ (variation selon les sollicitations climatiques).

La canopée permet donc de fortement limiter la surchauffe, toutefois il est à noter que les pertes sont nocturnes et les gains diurnes⁹. De plus, en journée la température de la tôle est toujours supérieure à celle de l'air extérieur ($\Delta T \approx 6^{\circ}C$). Considérant les conditions météorologiques et la cinétique du champ thermique, il apparaît que cette différence provient de l'irradiation. Afin d'obtenir une différence nulle ($\Delta T = 0^{\circ}C$), il est nécessaire que la canopée limite davantage les intrants, ce qui peut se faire selon deux approches : augmenter la protection radiative (donc le LAI), ou bien augmenter la capacité de la plante à transpirer. Ces deux approches théoriques ayant la même finalité : augmenter la densité foliaire de la canopée, donc le LAI. Cette approche

9. Considérant l'intensité du flux et sa répartition circadienne, le transfert thermique dans le bâtiment peut être lissé si, sous la PCV, se trouve un composant légèrement isolant ou inertique (*ex* : une lame d'air non ventilée).

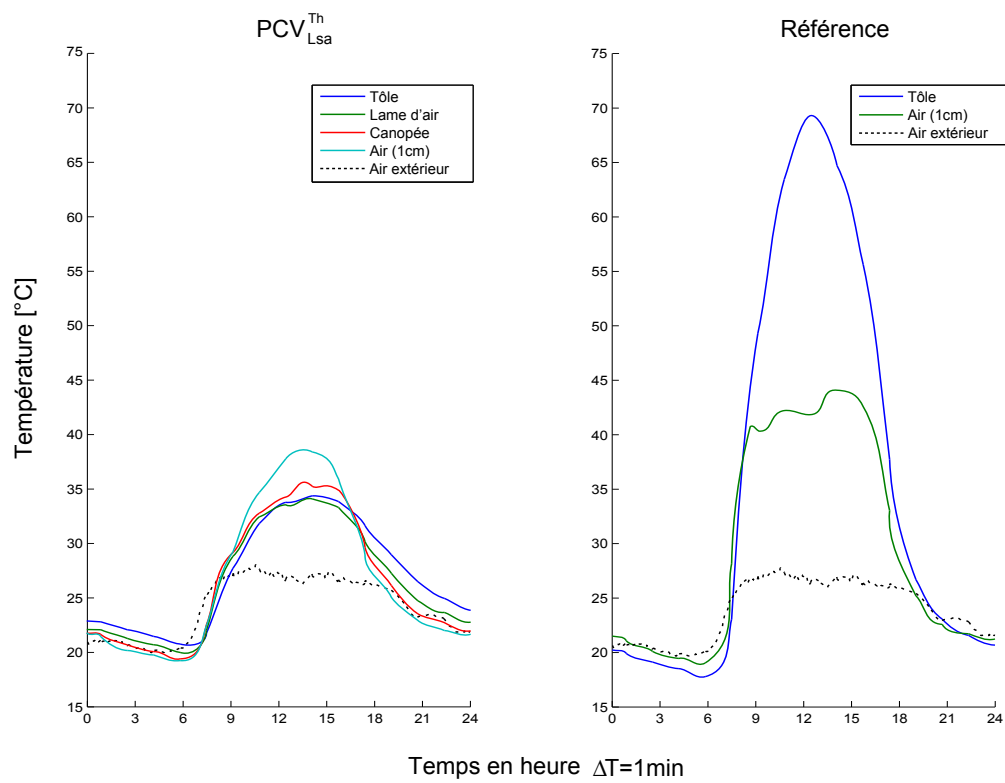


Figure 5.12 – Évolution du champ thermique au sein des échantillons au cours de la journée (PCV^{Th}_{Lsa}).

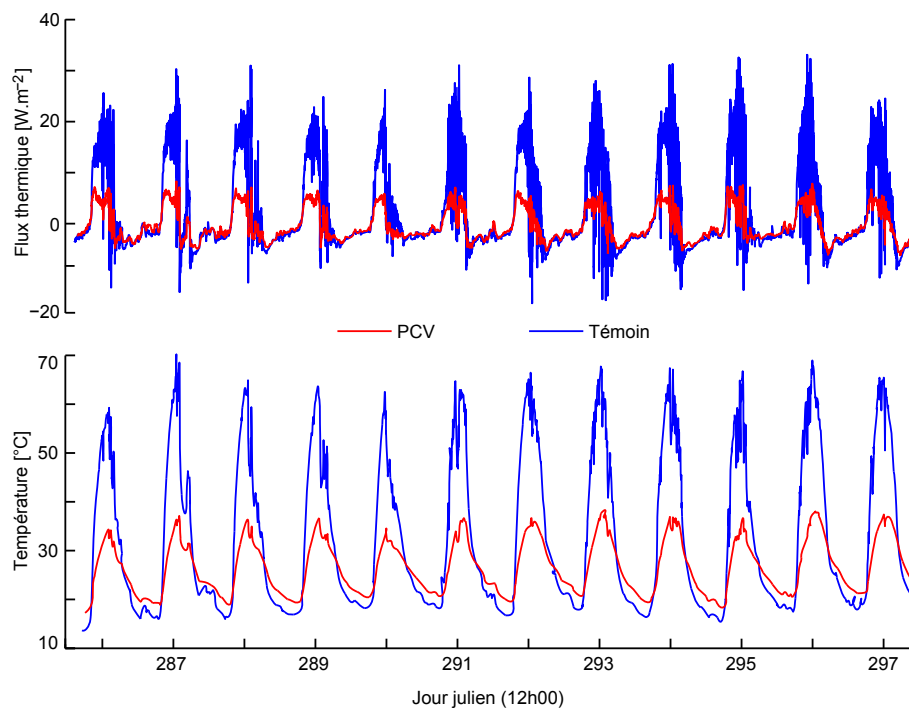


Figure 5.13 – Évolution des températures et flux au contact de la tôle.

permettant de limiter si besoin¹⁰ les pertes nocturnes, car les feuilles absorbent quasiment tout

10. La limitation des pertes nocturnes n'est pas toujours nécessaire selon la stratégie mise en place pour la

le rayonnement GLO [PALOMO DEL BARRIO, 1998].

Enfin, l'épaisseur de la lame d'air peut jouer un rôle prépondérant dans le transfert thermique. En effet, selon les propriétés intrinsèques de la plante, si la température de la canopée tend vers celle de l'air extérieur, alors une lame d'air ventilée¹¹ peut permettre d'évacuer le surplus de calories présentes dans la tôle ; à contrario, si la température de la canopée tend¹² vers une limite inférieure à celle de l'air extérieur, alors l'absence de lame d'air peut permettre de diminuer sensiblement la température de la tôle (induisant un flux négatif en journée).

Cette seconde approche possède l'avantage d'être en adéquation avec les sollicitations (contrairement aux pertes induites par évaporation). En effet, le phénomène de transpiration sera initié par la plante (au prorata de ΔT) uniquement si $\Delta T > 0$, avec $\Delta T = T_f - T_f^{max}$, où T_f est la température des feuilles et T_f^{max} correspond à la borne supérieure de la plage des températures adéquates pour le métabolisme de la plante. À noter que les besoins en transpiration de la plante¹³ apparaissent lorsque les besoins en rafraîchissement se font ressentir pour le bâti (si ce dernier est sans inertie). Le couplage du bâti et de la végétation à cette fin est défini¹⁴ par la notion de « rafraîchissement biologique ».

5.3.3 Comparatif : Influence sur la température de plafond

Le dimensionnement d'une PCV, donc la définition de ses performances thermiques, dépend principalement du bâti et de son environnement d'implantation. Lors du processus visant à établir la composition de la PCV deux approches sont possibles en vue d'obtenir les performances souhaitées. Il s'agit d'optimiser la PCV ou bien de coupler de celle-ci avec une isolation adéquate (PMR, MCP, lame d'air, *etc.*). Dans le cas présent, l'étude porte sur une comparaison de l'impact des installations sur la température en surface du plafond, *i.e.* des différents cas d'études additionnés d'une lame d'air confinée.

Par définition, une lame d'air confinée permet d'augmenter légèrement l'inertie thermique du système étudié et d'accroître l'isolation. L'impact de celle-ci sur les quatre ISOTEST est présentée par le tableau 5.5. Leurs cinétiques sont quant à elles définies par la figure 5.14. Comparativement aux résultats précédents (tab 5.3 et 5.4) il apparaît que la lame d'air conserve les tendances initiales.

Table 5.5 – Principales données statistiques circadiennes mesurées en face interne du plâtre

	Températures [°C]		Densités de flux [W.m ⁻²]	
	Moyenne	Amplitude	Moyenne	Amplitude
PCV^{T_h}_{Lsa}	26,4 ± 1,0	12,7 ± 1,3	-1,3 ± 0,2	10,5 ± 1,5
PCV^{T_h}_{ce}	25,3 ± 1,0	7,9 ± 1,0	-1,5 ± 0,4	9,2 ± 1,0
Substrat	27,4 ± 1,3	11,8 ± 1,7	0,0 ± 0,6	11,2 ± 2,3
Témoin (tôle)	29,4 ± 1,5	24,7 ± 2,8	3,6 ± 1,0	66,2 ± 6,8

— Analyse —

Considérant la surface interne du plafond, il apparaît que la PCV^{T_h}_{Lsa} induit un comportement thermique similaire au substrat seul ; toutefois, la température du plafond est en moyenne un degré plus faible et ne souffre pas de la surcharge pondérale. Comparativement à la PCV^{T_h}_{Lsa}, la PCV^{T_h}_{ce} possède une amplitude thermique ainsi qu'une moyenne plus faible. Cette différence

gestion des transferts thermiques. Voir note n° 9.

11. Dans le cas présent, la lame d'air initiale a été réduite à ~ 5 cm lors de la croissance de la plante. Cette épaisseur n'est pas suffisante pour limiter correctement les intrants par vent faible.

12. Dans le cas où la température de « confort » nécessaire au métabolisme de la plante (T_f^{max}) soit inférieur à la température d'air extérieur (T_{ae}).

13. Pour une plante en C3 ou C4, et selon leurs besoins physiologiques.

14. Définition présentée section 1.3.4.1

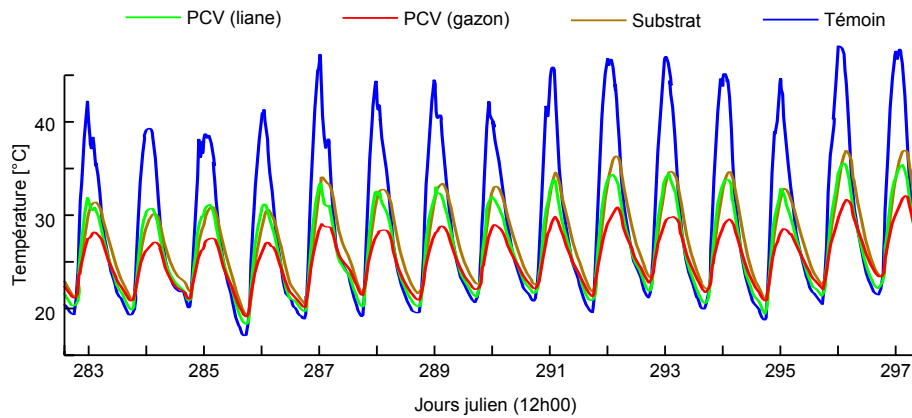


Figure 5.14 – Évolution des températures en face interne du plâtre.

provient de l'inertie supplémentaire, mais surtout de l'évaporation. À noter que cette différence est à relativiser dû au fait de la saturation en eau biquotidienne de la $PCV_{ce}^{T_h}$ (induit une évaporation maximale – cas idéal) ; La $PCV_{Lsa}^{T_h}$ quant à elle possède un potentiel de transpiration partiellement exploité dû au fait de la jeunesse de la plante (épaisseur de la canopée non stabilisée).

La $PCV_{Lsa}^{T_h}$ permettant des températures nocturnes plus basses que la $PCV_{ce}^{T_h}$, une réduction suffisante de l'amplitude thermique devrait permettre d'obtenir une isolation circadienne plus importante que celle prodiguée par la $PCV_{ce}^{T_h}$. Cette réduction pourrait provenir d'une augmentation adéquate de l'épaisseur de la canopée (donc de la protection solaire et de la transpiration). Ceci fera l'objet d'une étude ultérieure.

Concernant la caractérisation de la performance thermique, il a été choisi d'utiliser un indice (sous forme de gain) positionnant les toitures testées sur une échelle bornée par le cas le plus défavorable (0%, *i.e.* {toiture tôle+lame d'air}) et le cas idéal (100%, *i.e.* toiture permettant d'obtenir une température sous plafond identique à la température d'air extérieur.). Selon cette approche, les gains obtenus par les quatre toitures testées sont présentés par le tableau 5.6. Il apparaît que les $PCV_{ce}^{T_h}$ et $PCV_{Lsa}^{T_h}$ permettent respectivement un gain moyen relatif de 75,1% et 55,2%. De plus, contrairement au substrat, la répartition de ce gain est assez homogène sur la journée (*i.e.* rapportée à la température d'air externe, la réduction tend à être constante.).

Table 5.6 – Gain relatif à la température en face interne du plâtre

	$PCV_{Lsa}^{T_h}$	$PCV_{ce}^{T_h}$	Substrat	Témoin (tôle)
Gain*	55,2% (57,4%)	75,1% (80,7%)	37,1% (64,6%)	0,0% (0,0%)

* : Les données entre parenthèses correspondent aux gains moyens lors de l'irradiation maximale.

Enfin, l'obtention de ces comportements est fortement corrélée à la réduction de la température en surface des parois testées. Cette relation étant confirmée par les mesures de températures effectuées ainsi que par une visualisation des champs thermiques en présence. Ceux-ci sont présentés par la figure 5.15. La caméra infrarouge utilisée à cette fin permettant la définition d'une unique émissivité par cliché, le choix a été fait de prendre une valeur moyenne afin de permettre une vue d'ensemble¹⁵.

— Conclusion —

Dans les conditions de l'expérimentation, et au regard de l'indicateur utilisé (le gain), la $PCV_{ce}^{T_h}$ permet la meilleure isolation, il vient ensuite la $PCV_{Lsa}^{T_h}$, le substrat et enfin la tôle nue.

15. La portée de cette approximation étant limitée par le fait que les émissivités des quatre surfaces sont comprises entre 90 et 1 et d'autre part, car le but de ces clichés n'est pas une mesure précise, mais simplement une représentation graphique approximative des champs thermiques en présence.

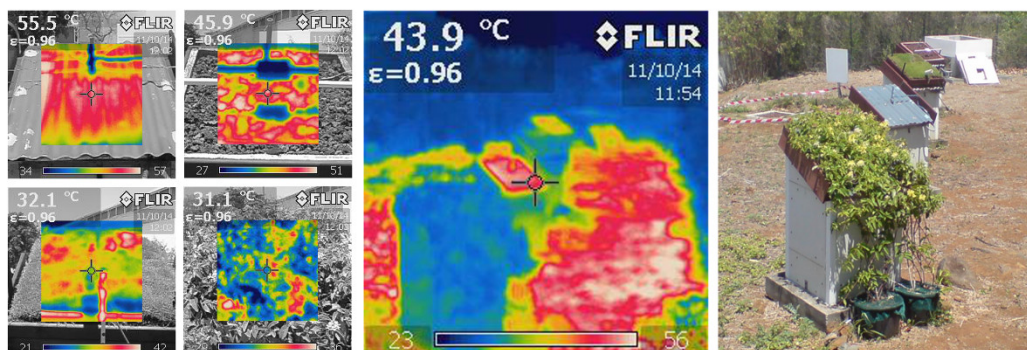


Figure 5.15 – Champs thermiques en surface des ISOTEST par un ciel clair (12h).

Toutefois, ce classement est à pondérer en fonction des capacités d'évaporation et de transpiration des PCV en présence.

Pour finir, du point de vue de l'application, la notion de « meilleure » isolation n'a de sens qu'en fonction des besoins et/ou paramètres affectant le choix lors de la conception du bâti. *Id est* : vis-à-vis du prix, de la facilité d'installation, d'entretien, des contraintes sur le bâti, de la température résultante souhaitée, *etc.* Enfin, le cas échéant, une isolation complémentaire peut être apportée *via* une lame d'air, un PMR, ou tout autre matériau permettant d'atteindre le cahier des charges établi.

Section 6

Exploitation des résultats

Dans le but d'adapter l'usage des PCV aux contraintes climatiques et architecturales réunionnaises, l'objectif de ces travaux est d'en accroître la compréhension phénoménologique. En ce sens, l'objet de cette section est de présenter la caractérisation des complexes de toitures testées. Plus précisément, il s'agit de déterminer les comportements des flux associés aux principaux phénomènes thermiques en présence et, consécutivement, de définir les indices de performance associés.

6.1 Introduction

Suite à l'analyse des résultats bruts issus de la séquence expérimentale vient l'exploitation des résultats. L'objectif étant de caractériser thermiquement les toitures testées, deux étapes sont alors nécessaires :

- estimer la répartition des densités de flux dans les systèmes étudiés ;
- obtenir les indicateurs de performances associées (facteur de transmission et résistance thermique apparente).

Pour les raisons explicitées dans la section précédente, la journée utilisée est une journée type de classe 1 (fort ensoleillement, faible vent, faible humidité relative, *cf.* section 5.1). Tous les résultats présentés ici sont issus de cette dernière.

6.2 Cinétique et répartition des flux thermiques

6.2.1 Approche

Étape primordiale dans la compréhension du système étudié, la répartition des densités de flux thermiques est issue de l'obtention des flux en présence et de leurs intensités respectives. La principale difficulté réside alors dans l'obtention de ces intensités, car leurs mesures ne sont pas toujours aisées. Il s'agit par exemple de l'évaporation, la transpiration, la convection, mais aussi l'impact sur les densités de flux thermique de l'activité métabolique de la plante, la respiration, la photosynthèse, *etc.*

Afin de pallier ces difficultés, l'approche utilisée est basée sur un bilan énergétique simplifié (eq. 6.1) dans lequel les phénomènes de transfert de type latent (évaporation et transpiration) sont regroupés au sein de l'évapotranspiration (E_{Tr}) ; les autres phénomènes, donc associés à un transfert de type sensible et non explicitement définis (mesurés) en surface, sont considérés au sein de l'adduction externe (H_e).

$$R_n = H_e + E_{Tr} + S_t + H_i \quad (6.1)$$

Le rayonnement net reçu par la surface (R_n) est défini par le bilan des densités de flux radiatifs CLO¹ et GLO en présence. Avec :

$$R_n = \varphi_{CLO} + \varphi_{CLO} \quad (6.2)$$

$$\varphi_{CLO} = I_r^{mes} - R_t^{mes}(1 - C^{cyl})(1 - F^{alb})^{-1} \quad (6.3)$$

$$\varphi_{CLO} = \varepsilon_t \sigma T_t^4 - [F_{vc} \varepsilon_{vc} \sigma T_{vc}^4 + (1 - F_{vc}) \varepsilon_{env} \sigma T_{env}^4] \quad (6.4)$$

Où pour le rayonnement CLO I_r^{mes} correspond à l'irradiation mesurée dans le plan de la toiture, R_t^{mes} l'irradiation réfléchie mesurée, C^{cyl} la correction du flux mesuré inhérente au cylindre de protection (Cf. section 4.2.3.2) et F^{alb} le facteur de forme associé à la perturbation de l'irradiation reçue par la toiture dû à la présence de l'albédomètre (ombre portée). Pour le rayonnement GLO, ε_t , ε_{vc} et ε_{env} correspondent respectivement aux émissivités GLO de la toiture (végétation : 0,95 ; substrat et tôle : 0,9), de la voute céleste (1) et de l'environnement (0,9). Enfin, F_{vc} représente le facteur de voute céleste² observé depuis la toiture.

La densité de flux stockée dans le substrat (S_t) est obtenue *via* la mesure de la teneur en eau, des températures et de l'étude préalable des caractéristiques thermophysiques du scorie et du substrat utilisé.

$$S_t = \rho_{sub} c_{p,sub} \frac{\Delta z \Delta T^t}{\Delta t} \quad (6.5)$$

Où ΔT^t correspond à la différence de température observée entre deux pas de temps consécutifs et avec [JACOBSON, 1999] :

$$\rho_{sub} c_{p,sub} = (1 - \omega_{g,s}) \rho_{sub}^{sec} c_{p,sub}^{sec} + \omega_g \rho_{eau} c_{p,eau} \quad (6.6)$$

La densité de flux adducté en face interne de la paroi (H_i) est simplement la densité de flux mesuré à travers la tôle. À noter que le système étudié ici débute à la tôle et non au plâtre afin de permettre de définir l'impact uniquement des complexes ajoutés aux ISOTEST et non l'impact de la lame d'air non ventilée.

Pour ce qui est de l'évapotranspiration (E_{tr}) et de l'adduction externe, celles-ci sont déduites *via* une approche micro-météorologique : le ratio de BOWEN. Il est exprimé par $\beta = H_e/E_{Tr} = \gamma \Delta T / \Delta e$ (sec. 2.1.1.3.2). Ainsi :

$$E_{Tr} = \frac{R_n - (S_t + H_i)}{1 + \beta} \quad (6.7)$$

$$H_e = \beta E_{Tr} \quad (6.8)$$

6.2.2 Résultats et analyses

Le traitement des données acquises a permis d'identifier l'intensité des densités de flux présents et leurs répartitions. Ceux-ci sont présentés par les figures 6.1 et 6.3.

Sur la figure 6.1, la variation circadienne des densités de flux radiatifs (R_n) représente une hyperbole caractéristique liée à l'irradiation solaire. Cependant, le flux net comprend les bilans radiatifs de type CLO et GLO, ce qui explique les valeurs nocturnes non nulles et les valeurs négatives de la PCV_{ce}Th vers 18h (le rayonnement CLO est nul, l'arrosage induit alors une chute de la température de surface qui devient inférieure à celle de l'environnement, induisant un flux négatif).

L'évapotranspiration (E_{Tr}) est fortement liée aux conditions météorologiques. Il s'agit de l'un des flux les plus importants pour les surfaces en ayant la capacité (Cf. figure 6.3). Ainsi, elle est nulle pour la tôle et très faible pour le substrat ($\bar{\omega} = 0,026 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Par contre, le flux est important pour la PCV_{Lsa}Th, dont l'intensité est uniquement due à la transpiration (soit $\sim 30\%$ du transfert

1. Nota : l'équation 6.3 est utilisée uniquement pour les cellules ISOTEST 1, 2 et 4. L'absence d'albédomètre sur l'ISOTEST 3 (impact trop important sur le champ thermique) induit l'utilisation d'une approche théorique : $\varphi_{CLO} = I_r^{mes} \alpha$, avec $\alpha = 0.8$ [SKYANC et al., 2001] le coefficient d'absorption CLO de la tôle (bleu).

2. L'acquisition du facteur de voute céleste est présenté dans l'annexe 1.

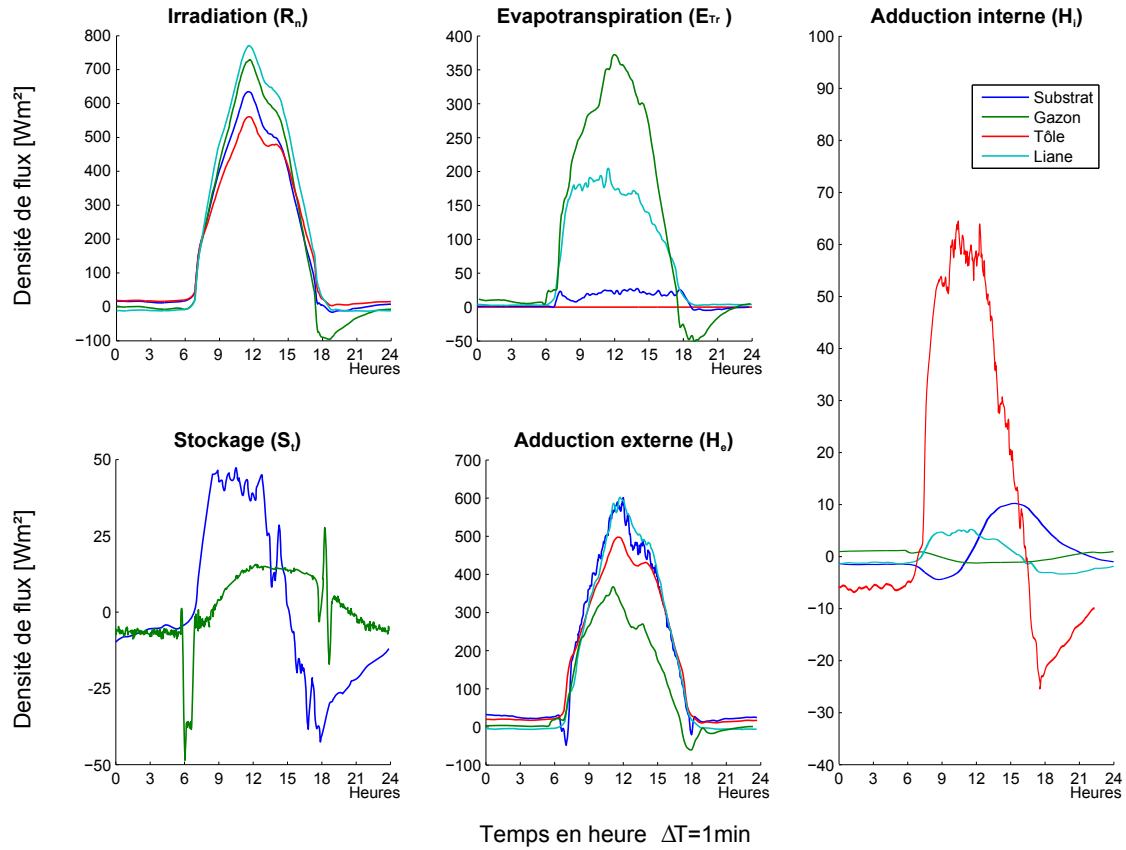


Figure 6.1 – Intensité des flux thermiques dans les échantillons pour une journée type de classe 1.

thermique); ce phénomène étant contrôlé par la plante, il explique dès lors les valeurs proches de zéro observées la nuit (*i.e.* la plante ne nécessite pas de rafraîchissement). La PCV_{ce}^{Th} quant à elle possède un flux nocturne non nul dû à l'évaporation de l'eau du substrat. Globalement le flux évapotranspiré représente $\sim 50\%$ des pertes issues de l'irradiation nette (corroboré³ par JIM et HE [2010]), et son intensité est fortement corrélée à l'irrigation du substrat (6h et 18h).

Enfin, il est à noter que l'évapotranspiration négative vers 18h suggère un changement de phase endothermique (condensation ou solidification), or (contrairement à JIM et HE [2010]) dans notre cas aucun de ces phénomènes n'est présent à cette heure. Il s'agit donc d'un artéfact⁴ issu principalement de l'irradiation nette négative (considérant l'équation 6.7; β étant positif).

Du point de vue du stockage (S_t), le substrat possède un flux bien plus important que la PCV_{ce}^{Th} . Ceci provient de l'effet couplé de la présence de la végétation et d'une plus grande inertie⁵; tous deux ayant pour conséquence de limiter l'intensité et d'induire un déphasage (3h30) du flux stocké. À noter que les artéfacts présents sur la courbe de la PCV_{ce}^{Th} sont dus à l'arrosage.

L'adduction externe (H_e) représente les flux les plus importants en terme de pertes, ils sont fortement corrélés aux conditions météorologiques⁶, comme l'indique l'hyperbole carac-

3. L'étude considère également le *Zoysia Tenuifolia* sous un climat tropical humide (Hong Kong), suivant des conditions météorologiques similaires.

4. Plus précisément, le phénomène endothermique observé n'est pas issu d'un changement de phase, mais de l'adduction externe. Il semblerait que l'approche *via* le ratio de BOWEN ne permette pas de dissocier évapotranspiration et adduction externe dans ces conditions très spécifiques.

5. Substrat de l'ISOTEST 1 (100% scories) : $\rho c_p = [4, 04; 4, 21] \cdot 10^5 \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ pour $\omega = [0.024; 0.028] \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Substrat de l'ISOTEST 2 (84% scories, 16% terreau) : $\rho c_p = [1, 01; 1, 37] \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ pour $\omega = [0.124; 0.210] \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

6. L'irradiation étant la source de la différence de température entre la surface de la toiture et l'environnement,

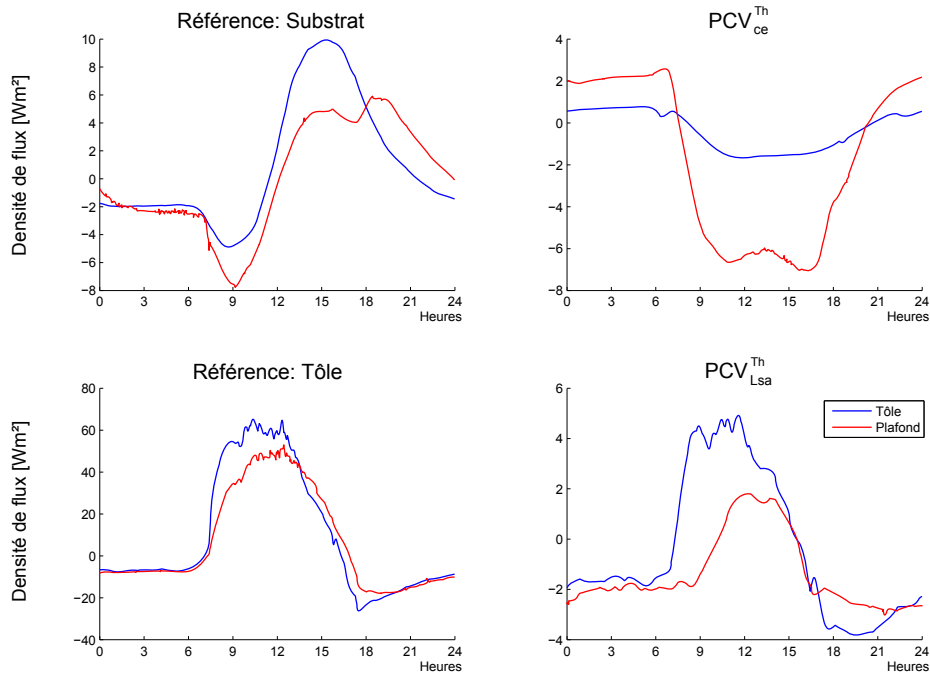


Figure 6.2 – Flux thermiques présents dans la lame d'air de chacun des échantillons pour une journée type de classe 1.

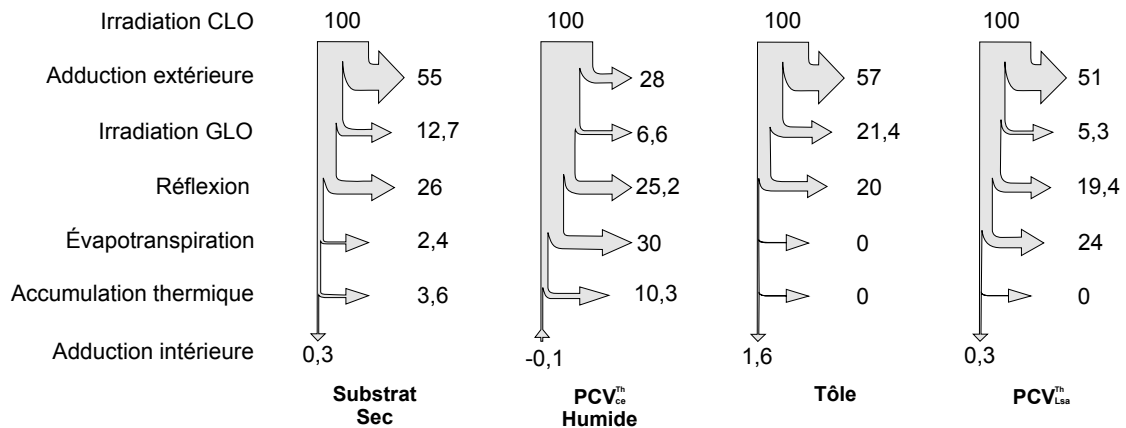


Figure 6.3 – Répartition des flux thermiques dans les échantillons pour une journée type de classe 1 (pour une irradiation CLO brute $> 150 \text{ W.m}^{-2}$), unités arbitraires.

téristique⁷. Il s'avère que dans les conditions de l'expérimentation les échantillons de toiture substrat et $\text{PCV}^{\text{Th}}_{\text{Lsa}}$ possèdent sensiblement les mêmes valeurs. La tôle est quant à elle un peu plus basse due à sa forte adduction interne. Enfin, la $\text{PCV}^{\text{Th}}_{\text{ce}}$ se démarque avec un flux 58% inférieur. Ceci est dû à l'évapotranspiration. En effet, les pertes vers l'extérieur sont ici de deux types : évapotranspirative ou adductive; la présence d'eau libre à la surface (irrigation) et dans le substrat induisant un flux évapotranspiratif important (51% des pertes externes), le

celui-ci est donc le principal moteur du flux adductif externe.

7. Toutes les sollicitations météorologiques sont liées (directement ou non) à l'irradiation solaire.

flux adductif est donc proportionnellement affaibli. À noter que nous sommes en présence de deux stratégies de régulation thermique différentes⁸. En effet, les températures des deux PCV étant sensiblement identiques, les flux perdus sont donc également sensiblement les mêmes. Or dans le cas de la PCV_{ce}Th ce flux est défini par $E_{Tr} = 51\%$ et $H_e = 49\%$ contre $E_{Tr} = 24\%$ et $H_e = 75\%$ pour la PCV_{lsa}Th, soit des β moyens équivalant à 0,96 et 3,14, respectivement. Selon JIM et HE [2010], la valeur β associée au *zoysia tenuifolia* évolue annuellement (en climat tropical humide) sur $[0,70 - 0,75]$, mais pour une teneur en eau du substrat bien supérieure, augmentant les capacités d'évaporation. Par ailleurs, dans cette même étude la valeur maximale de β pour les PCV (irriguées) étudiées est de 1,24 pour une PCV_{ci}Th dont la végétation est composée d'arbustes, donc bien loin de la valeur obtenue pour la liane (3,14). Ceci, car dans notre étude la PCV_{lsa}Th ne possède pas de substrat, il n'y a donc pas d'évaporation, induisant mathématiquement une valeur plus importante de β . Pour finir, toujours selon cette étude, il est à noter que l'augmentation de β est aussi liée à l'architecture de la plante, il augmente de manière séquentielle avec la surface foliaire et la complexité structurale de la biomasse.

L'adduction interne (H_i) est le principal flux observé en physique du bâtiment ; il correspond ici aux gains pour la lame d'air de la toiture. Considérés au niveau de la tôle dans notre étude, les flux diffèrent donc en intensité et en comportement en fonction des toitures considérées⁹. Leurs valeurs moyennes sont de $1,1 \pm 0,4 W.m^{-2}$ pour le substrat, $-0,2 \pm 0,2 W.m^{-2}$ pour la PCV_{ce}Th, $2,1 \pm 0,3 W.m^{-2}$ pour la tôle et de $-0,6 \pm 0,2 W.m^{-2}$ pour la PCV_{lsa}Th (Cf. sections 5.3.1 et 5.3.2). Les PCV permettent donc en moyenne un rafraîchissement de l'enceinte. De plus, les trois systèmes étudiés permettent de limiter considérablement l'intensité des flux (intrants et sortants) respectivement de 84%, 96% et 89% pour le substrat, la PCV_{ce}Th et la PCV_{lsa}Th (moyenne circadienne).

Concernant les comportements, un déphasage lié à l'inertie des couches présentes au-dessus de la tôle apparaît, il est de 3h10 pour le substrat et 4h32 pour la PCV_{ce}Th. À noter que bien que les PCV possèdent un flux moyen similaire, leurs comportements divergents : le sens des flux circadiens sont quasiment toujours opposés, traduisant la prédominance de phénomènes différents.

Selon la figure 6.3, il apparaît que le substrat possède un flux réfléchi proche de celui de la tôle (à 5% près) ; en comparaison, le faible flux adductif interne provient donc de l'inertie des scories, qui permet de stocker l'énergie en surface puis de la perdre par adduction externe. La PCV_{ce}Th possède le même phénomène auquel se couple l'évapotranspiration. Ceux-ci permettent dès lors de réduire suffisamment la température du substrat pour induire un flux négatif, donc rafraîchissant la lame d'air dans la toiture (alors que l'irradiation est maximale). Or, la température de surface interne du plafond augmente en journée (fig. 5.14) intensifiant le flux à travers celui-ci (fig. 6.2), ceci est dû aux flux thermiques passant à travers les parois latérales de l'ISOTEST. Dans ces conditions la PCV_{ce}Th est donc plus « isolante » que les parois¹⁰ en polyuréthane. À noter que le flux nocturne est positif pour la même raison : les pertes thermiques à travers les parois latérales induisent une température d'enceinte inférieure à celle du substrat, provoquant une adduction interne positive.

Contrairement à la PCV_{ce}Th, la PCV_{lsa}Th se caractérise par un flux nocturne négatif et un flux diurne positif. Ce dernier possède un déphasage de l'extremum maximum de 15 min, associé à une réduction des intrants par la canopée de $95 \pm 1\%$. La nuit, ce flux suit la même tendance que celui de la tôle, avec une perte plus importante en soirée due à la surchauffe diurne puis une stabilisation. Cependant, l'intensité de cet échange est bien plus faible que pour la tôle, puisque réduite de $76 \pm 2\%$ et finissant entre minuit et 6h à $-1,6 \pm 0,1 W.m^{-2}$. Considérant sur cette période la différence de température entre la tôle et l'air extérieur pour les ISOTEST 3 et 4 (respectivement $-2,89 \pm 0,22^\circ C$ et $0,04 \pm 0,27^\circ C$), il apparaît que dans le cas de l'ISOTEST 4 le phénomène convectif est prépondérant. Par conséquent, le phénomène d'échange radiatif de

8. À noter que l'effet de l'irrigation en surface n'est visible que jusque 10h, celle-ci ne fausse donc pas la tendance moyenne diurne de l'évapotranspiration.

9. Le comportement du flux obtenu pour l'ISOTEST n°3, témoin composé d'une tôle non recouverte, est corroboré par les résultats obtenus sur une cellule ISOTEST dans les mêmes conditions par MIRANVILLE [2002].

10. Parois aux surfaces blanches composées ainsi : 1 mm d'acier – 60 mm de polyuréthane – 1 mm d'acier.

type GLO est fortement limité par la présence de la canopée. Cette remarque tend à corroborer le modèle de feuille noire pour le spectre GLO indiqué par PALOMO DEL BARRIO [1998].

De manière générale la lame d'air provoque une réduction du flux incident associée à un déphasage dont l'amplitude est corrélée à la puissance adductée à travers la tôle (fig. 6.2). La lame d'air induit donc une inertie thermique, dont l'impact semble être en fonction du sens du flux (observation qui tend à être confirmée par les mouvements convectifs, qui sont facilités lors des transferts induisant des pertes pour l'enceinte de l'ISOTEST).

Pour conclure la caractérisation des flux thermiques diurnes en présence, la figure 6.3 définit leurs répartitions moyennes pour une irradiation CLO supérieure à 150 W.m^{-2} . Afin d'en faciliter les comparaisons, les flux sont exprimés en unité arbitraire pour une irradiation nominale de 100 UA.

À noter que dans cette approche le flux GLO est dissocié, apportant une information précédemment absente dû au calcul du flux net. Il apparaît que ce flux est non négligeable pour la tôle et le substrat, alors qu'il est considérablement réduit lorsque la végétation est présente ($\sim 6 \text{ UA}$).

Par ailleurs, bien que les flux moyens associés aux PCV soient négatifs, seule la valeur de l'adduction interne de la PCV_{ce}^{Th} est négative. Ceci provient du mode de calcul. En effet, le flux concerné est divisé par la valeur du flux incident afin d'obtenir le ratio associé. Or, le comportement de la PCV_{Lsa}^{Th} étant synchrone avec l'irradiation solaire le ratio est positif, contrairement au comportement de la PCV_{ce}^{Th} qui est asynchrone.

Selon LAZZARIN et al. [2005] l'albédo d'une PCV classique est de 23%; la PCV_{Lsa}^{Th} possède un albédo proche de cette valeur : 19,4%. La différence provient du type de canopée étudiée (architectures, densités, absorptance des feuilles, etc.). Par ailleurs, la PCV_{ce}^{Th} possède un albédo de 25,2%, ce qui est corroboré par CAMPBELL et NORMAN [1998].

La caractérisation des flux thermiques au sein des PCV ayant été effectuée, il est nécessaire de définir des indicateurs simples permettant de quantifier leurs impacts sur le flux thermique. Cet aspect est traité dans la sous-section suivante.

6.3 Indicateurs de performance

Afin de quantifier les performances du complexe de toiture testé, deux indicateurs sont calculés : le facteur de transmission apparent (F^*) et la résistance¹¹ thermique apparente (R^*). Ces deux grandeurs constituent des critères de performance de parois reconnus, notamment utilisés par le CSTB [MILLET, 1988], mais également par la réglementation thermique RTAA-DOM. En toute rigueur, le calcul de ces indicateurs est valable uniquement en régime stationnaire. Afin de pallier cet écueil, les données sont traitées par une moyenne mobile arithmétique, dont la période est indiquée par le déphasage des systèmes étudiés.

6.3.1 Le facteur de transmission

— Présentation —

Le facteur de transmission (F^*), également appelé facteur d'écran, permet de caractériser le flux traversant la toiture¹² (φ_t) comparativement à l'irradiation subie (Ir^s). Sa formulation au pas de temps t est indiquée par l'équation 6.9. Cette approche est une généralisation du facteur de transmission solaire (FTS) [KOENIGSBERGER et al., 1973] utilisé pour la caractérisation des matériaux testés *in situ* [MIRANVILLE, 2002]. À noter que l'irradiation circadienne est composée

11. Dans l'optique de caractériser la protection thermique des bâtis contre les sollicitations extérieures, la conductance est dépréciée au profit de la résistance.

12. Donc entrant dans l'enceinte de l'ISOTEST.

des rayonnements incidents bruts CLO et GLO.

$$F^*(t) = \frac{\varphi_t(t)}{I_r^s(t)} \quad (6.9)$$

— Résultats —

Le traitement des données a permis d'obtenir la valeur du facteur de transmission pour la journée type sélectionnée. La représentation associée est présentée par la figure 6.4. Considérant l'évolution circadienne de cet indicateur, les résultats ont été moyennés selon quatre plages : circadienne, diurne, nocturne et FTS ($I_r^s > 500 \text{ W.m}^{-2}$). Elles permettent de mettre en avant le comportement spécifique de chacun des systèmes. Ces données statistiques sont présentées dans le tableau 6.1.

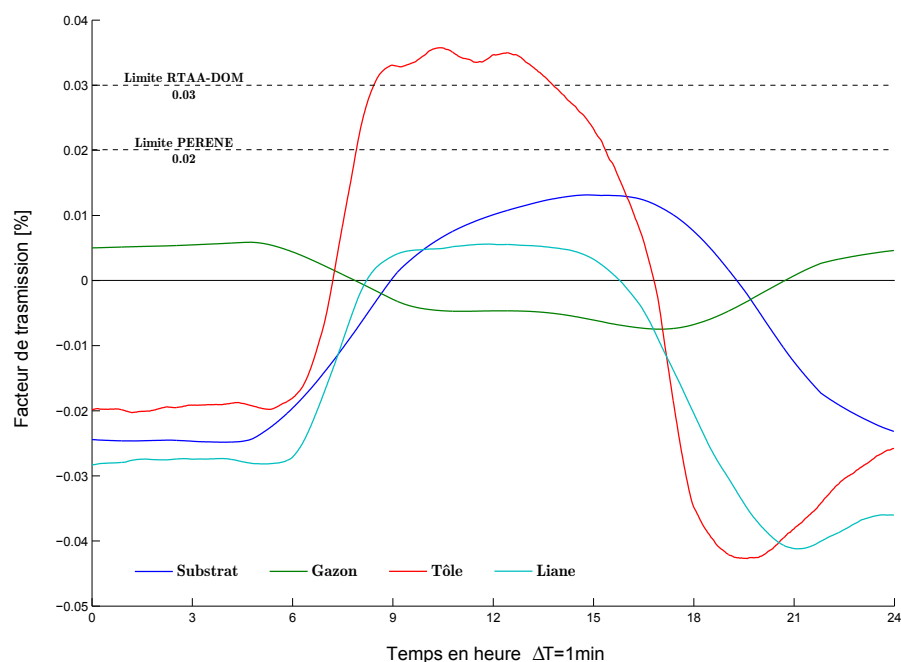


Figure 6.4 – Évolution circadienne des facteurs de transmission pour une journée type de classe 1 – le 2 mars 2015.

Table 6.1 – Moyennes des facteurs de transmissions en surface de plafond pour une journée type de classe 1 ($\times 10^{-3}$).

	Circadienne	Diurne	Nocturne	FTS
ISOTEST 1 : Substrat	$-9,30 \pm 8,24$	$0,40 \pm 5,53$	$-19,52 \pm 12,97$	$4,53 \pm 4,22$
ISOTEST 2 : PCV_{ce}^{Th}	$1,71 \pm 7,31$	$-1,81 \pm 5,73$	$5,46 \pm 8,83$	$-3,03 \pm 4,45$
ISOTEST 3 : Tôle	$-1,67 \pm 1,82$	$12,53 \pm 3,87$	$-16,66 \pm 4,14$	$27,20 \pm 4,08$
ISOTEST 4 : PCV_{Lsa}^{Th}	$-13,60 \pm 2,80$	$-4,17 \pm 3,90$	$-23,51 \pm 3,86$	$2,49 \pm 3,09$

— Analyse —

Il apparaît que les facteurs de transmission sont dissociables en deux plages : diurne et nocturne.

Conformément aux flux obtenus (fig. 6.2) le substrat, la tôle et la PCV_{Lsa}^{Th} sont synchronisés avec l'irradiation solaire alors que la PCV_{ce}^{Th} est asynchrone. Les valeurs diurnes (6h–18h) présentent une certaine linéarité une fois le soleil assez haut dans le ciel (8h–16h); alors que les valeurs nocturnes sont linéaires (pente tendant vers zéro) sur la plage [0–5]h. À noter que l'état intermédiaire sur la plage 17h–24h provient de l'inertie des toitures (stabilisation lente, car l'irradiation nette nocturne est en moyenne 29 fois plus faible que son équivalent diurne).

Considérant l'importance de l'irradiation solaire, une moyenne des facteurs de transmission pour une irradiation solaire supérieure à $500 W.m^{-2}$ est calculée : le facteur de transmission solaire (FTS). Les résultats obtenus sont à rapprocher des consignes de la réglementation thermique RTAA-DOM et de l'outil PERENE, selon lesquelles la valeur limite pour une protection solaire efficace en toiture à l'île de La Réunion (altitude inférieure à 400 mètres) est respectivement de $FTS^{max} = 0,03$ et $FTS^{max} = 0,02$. En tenant compte de l'incertitude, les complexes de toiture des ISOTEST 1, 2 et 4 sont conformes pour une journée type de classe 1. Seule l'ISOTEST 3 n'est pas conforme¹³ avec un FTS de $0,027 \pm 0,004$. À titre de comparaison, l'ajout d'un matériau mince réfléchissant dans le complexe de toiture de l'ISOTEST 3 permet d'obtenir un FTS de 0,015 [MIRANVILLE, 2002]. Enfin, il est à noter que les résultats obtenus par HODO-ABALO [2013] en climat tropical humide confortent le FTS négatif obtenu pour la PCV_{ce}^{Th} .

6.3.2 La résistance thermique apparente

— Présentation —

La résistance thermique apparente (R^*), permet de caractériser l'isolation apportée par les complexes de toitures mis en œuvres. La méthode employée est celle de la norme ISO 9869-1994, qui donne deux méthodes pour le calcul de la résistance thermique des parois sur la base de données en régime dynamique : la méthode de la moyenne et la méthode dynamique, toutes deux implémentées sous ISOLAB. La méthode de la moyenne a été utilisée, la méthode dynamique n'étant pas encore fiabilisée au niveau ISOLAB.

La méthode s'appuie sur le calcul de moyennes temporelles des séries de données (températures et flux) afin de déterminer la résistance thermique ; si les conditions initiales et finales de la base de données sont similaires et si le régime est quasi-stationnaire, alors on montre que cette valeur converge vers celle en régime permanent [MIRANVILLE et al., 2006].

Sa formulation est indiquée par l'équation 6.10, où φ_p est la densité de flux mesurée en surface interne de la paroi (côté enceinte), $T_{p,i}$ et $T_{se,i}$ les températures en surface interne et externe de la paroi.

$$R^*(t) = \frac{\sum_{i=1}^n T_{se,i}(t) - T_{p,i}(t)}{\sum_{i=1}^n \varphi_{p,i}(t)} \quad (6.10)$$

Idéalement, la base de données doit être la plus exhaustive possible et comporter un minimum de 15 jours de données complètes. Les conditions énoncées pour la convergence sont vérifiées, si les deux indicateurs suivants sont simultanément vérifiés :

1. L'écart relatif ϵ_1 entre la résistance calculée sur la base de données totale et celle calculée sur la base de données moins 1 jour est inférieur à 5% ;
2. L'écart relatif ϵ_2 entre la résistance calculée sur les premiers 2/3 de la base de données et celle calculée sur les derniers 2/3 de la base de données est inférieur à 5%.

— Résultats —

Pour chacun des cas d'études les complexes de toitures ont été analysés afin d'obtenir les résistances associées aux « surtoitures », puis aux toitures complètes. Les approches sont présentées ci-dessous :

13. Résultats corroborés par la sensation d'inconfort manifeste reconnue pour cette conception courante dans le parc immobilier réunionnais.

ISOTEST 1 : complexe de toiture BA13/lame d'air + tôle/substrat ;
 ISOTEST 2 : complexe de toiture BA13/lame d'air + PCV $_{ce}^{T_h}$ (gazon) ;
 ISOTEST 3 : complexe de toiture BA13/lame d'air + tôle (référence) ;
 ISOTEST 4 : complexe de toiture BA13/lame d'air + PCV $_{Lsa}^{T_h}$ (liane).

Première approche : caractérisation des « surtoitures »

T_{se} : température de surface supérieure des couvertures

ISOTEST 1 : surface du substrat ; ISOTEST 2 : surface du gazon par IR ;
 ISOTEST 3 : température de tôle ; ISOTEST 4 : surface de la liane estimée ;

T_p : température de tôle, sauf pour ISOTEST 3, température du plafond ;

φ_p : flux à travers la tôle sauf pour ISOTEST 3, flux à travers le plafond.

Seconde approche : caractérisation des toitures

T_{se} : température de surface supérieure des couvertures

ISOTEST 1 : surface du substrat ; ISOTEST 2 : surface du gazon par IR ;
 ISOTEST 3 : température de tôle ; ISOTEST 4 : surface de la liane estimée ;

T_p : température de plafond ;

φ_p : flux à travers le plafond.

Table 6.2 – Résistances apparentes associées aux « surtoitures ».

	ISOTEST 1	ISOTEST 2	ISOTEST 3	ISOTEST 4
R^* [m ² .K.W ⁻¹]	1,87	1,32	0,96	1,04
ϵ_1 [%]	1,1	3,1	0,2	0,7
ϵ_2 [%]	1,3	7,8	2,6	4
$\overline{\Delta T}$ [°C]	1,6	-0,2	2,06	-0,6
$\overline{\varphi}$ [W.m ⁻²]	0,46	-0,19	2,14	-0,74

Table 6.3 – Résistances apparentes associées à l'ensemble du complexe de toiture.

	ISOTEST 1	ISOTEST 2	ISOTEST 3	ISOTEST 4
R^* [m ² .K.W ⁻¹]	0,21	0,62	0,96	0,70
ϵ_1 [%]	6,25	0,51	0,15	3,28
ϵ_2 [%]	2,98	2,75	2,56	1
$\overline{\Delta T}$ [°C]	1,4	-0,2	2,1	-1,03
$\overline{\varphi}$ [W.W ⁻²]	-0,58	0,19	2,1	-1,47

Le traitement des données a permis d'obtenir les valeurs des résistances apparentes pour la journée type sélectionnée. Ces données statistiques sont présentées dans les tableaux 6.2 et 6.3. À noter que la base de donnée utilisée (jours juliens 281 à 303) est trop juste pour avoir des résultats fiables, toutefois ils sont valables en première approche ; compte tenu de la faible base de données, $\epsilon_2 > 5\%$ est accepté. De plus, en toute rigueur, le calcul de la résistance

apparente basé sur la méthode de la moyenne ne s'applique pas aux parois à très forte inertie ; cependant, elle convient en première approche (l'idéal étant d'utiliser la méthode dynamique de la norme ISO).

— Analyse —

La première approche permet de comparer la performance des surtoitures par rapport à une toiture intégrant une lame d'air non ventilée, donc par définition déjà isolante. Il apparaît que toutes sont du même ordre de grandeur ; la résistance apparente de l'ISOTEST 4 est équivalente à celle de l'ISOTEST 3 et la résistance de l'ISOTEST 1 est la plus importante.

La seconde approche donne de premiers éléments sur la performance des toitures, qui peuvent être comparées entre elles ; attention toutefois, l'échelle réduite ne permet pas d'extrapoler les résultats à l'échelle 1 et donne simplement une idée de la performance comparative des systèmes de toitures, dans les conditions de l'étude.

Les résultats comparés à la toiture de référence montrent, sur la période étudiée, des performances légèrement en retrait pour les PCV. Cet aspect est lié au fait que cet indicateur est adapté pour la comparaison de parois ayant les mêmes conditions aux limites. Or, la température de la surface supérieure de la couverture végétale est nettement plus faible que celle de la tôle (mise en évidence d'une barrière au flux solaire). De plus, comparé à une couverture tôle classique, la charge en dessous de la couverture végétale est alors plus faible, ce qui induit une température de sous-face de plafond également beaucoup plus faible. Ces configurations permettraient dès lors d'améliorer les conditions de confort dans l'enceinte. Des études à échelle 1 sont nécessaires pour corroborer cette hypothèse.

Sur la base de ces données, on constate une bonne performance des PCV, un peu supérieure pour la $PCV_{L_{sa}}^{T_h}$, ce qui a tendance à justifier notre approche, en plus des éléments précédemment mis en exergue. Enfin, au regard des températures de surface, l'indicateur R^* apparaît ne pas être suffisant pour caractériser l'impact des PCV, ni pour les comparer aux toitures classiques.

Section 7

Synthèse

Dans l'optique de répondre à la problématique, et suivant la méthodologie choisie, une étude expérimentale a été développée. En ce sens, diverses actions ont été effectuées, conduisant *in fine* à notre objectif : la caractérisation expérimentale des PCV étudiées. La présente section en fait la synthèse.

La finalité des travaux expérimentaux entrepris est double ; il s'agit d'augmenter l'état des connaissances relatives aux PCV d'une part, et d'autre part de permettre le développement des PCV sur le territoire réunionnais. Précisément, il s'agit de répondre aux questions (1) et (2) de la problématique :

Question 1 : « *Les parois végétalisées sont-elles adaptées au climat réunionnais ?* »

Question 2 : « *Quelle solution technique mettre en œuvre afin d'adapter les parois végétalisées au mode constructif réunionnais ?* »

Parmi les questions sous-jacentes se trouve la caractérisation des comportements thermiques associés aux PCV étudiées, *via* l'explicitation des phénomènes en présence ainsi que par des indicateurs de performance. L'expérimentation doit également permettre de déterminer si, à La Réunion, la PCV_H peut se comporter comme une isolation thermique et/ou une pompe à chaleur, au point d'induire une sur-consommation énergétique (chauffage).

Dans l'optique de pouvoir déterminer l'impact d'une PCV_H, une fois la démarche expérimentale déterminée (sec. 2), la seconde étape a été de choisir les modalités de l'expérimentation *i.e.* : la plateforme expérimentale utilisée, les stations météorologiques nécessaires ainsi que les systèmes expérimentaux : bacs végétalisés et cellules ISOTEST (sec. 1).

Suite à l'étalonnage (et l'ajustage) des capteurs utilisés, l'étalonnage des expériences a été effectué (sec. 3). De plus, considérant les dimensions des ISOTEST, il a été essentiel de développer des capteurs spécifiques (sec. 4). Il s'agit des hygromètres et albédomètres, dont la conception des protections a nécessité la création de bancs d'essai et d'outils numériques génériques¹.

Pour finir, il a été nécessaire de définir les séquences utilisées lors du traitement des données (sec. 5). Afin de positionner les complexes de toitures testées dans les conditions les plus défavorables, seules des journées types de classe 1 ont été utilisées (fort ensoleillement, faible vent, faible humidité relative). La séquence sélectionnée correspondante s'étend du 13 au 24 octobre 2014.

1. Il s'agit de multiples modules génériques permettant de simuler le comportement solaire, le champ de vision, le facteur de forme, *etc.*, et dès lors mettre en place des expérimentations associées. Un outil de traitement des données en vue de leurs analyses a également été créé.

Les séquences expérimentales étudiées (sec. 5) ont permis de mettre en évidence la répartition et l'évolution des champs thermiques dans chacun des complexes de toitures testés. Il apparaît une nette diminution de la surchauffe induite par les PCV_H. En effet, définissant le gain sur l'échelle [0 – 100]%, respectivement associés à la température de tôle² et à la température d'air extérieur, la PCV_{ce}^{T_h} et la PCV_{Lsa}^{T_h} permettent un gain moyen relatif de 75,1% et 55,2%. Toutefois, il est nécessaire d'obtenir une base de données plus conséquente (une année minimum) afin de consolider les résultats.

Cependant, les flux négatifs observés³ permettent d'ores et déjà de conclure que les PCV peuvent agir comme des pompes à chaleurs à La Réunion. Toutefois, ce comportement est subordonné à une conception adéquate, couplée à des conditions météorologiques spécifiques. Par conséquent, l'hypothèse d'une déperdition conduisant à une surconsommation énergétique (chauffage) en saison froide est justifiée sur le territoire Réunionnais. À noter que la probabilité d'un tel comportement (qui croît avec l'altitude), couplée à une conception adéquate, est principalement réaliste pour des altitudes comprises entre 400m et 800m, ainsi que pour certaines localités possédant des microclimats particuliers.

Parmi les trois formes testées (PCV_{ce}^{T_e}, PCV_{ce}^{T_h} et PCV_{Lsa}^{T_h}), deux ont été spécifiquement définies pour les structures légères. La PCV_{ce}^{T_h} permet la meilleure isolation thermique (et acoustique), toutefois, sa forte charge pondérale est un frein à son développement. La PCV_{Lsa}^{T_h} quant à elle, bien que légèrement moins performante thermiquement, possède le plus d'atout pour une utilisation étendue (faible charge pondérale, facilité d'installation, bonnes propriétés thermiques). Dans des conditions adéquates, cette dernière approche induit la notion de « rafraîchissement biologique ». Plus généralement, le concept développé s'appuie donc sur l'une des technologies les plus avancées au monde, une technologie ayant des millénaires d'évolution : la vie.

Suite à l'analyse brute des données acquises, l'exploitation plus poussée des résultats a pu être réalisée, associant ces derniers à des modèles de comportement (ratio de BOWEN, température de ciel, *etc.*) en vue de permettre la caractérisation des phénomènes physiques en présence (sec. 6).

Il en ressort une cinétique des phénomènes qui est fonction de leurs capacités intrinsèques (inertie, réflectivité, *etc.*) mais également fortement corrélées aux conditions météorologiques. Conformément aux attentes les PCV_{ce}^{T_h} et PCV_{Lsa}^{T_h} permettent une réduction drastique de l'adduction interne (à travers la tôle), se comportant en moyenne comme une pompe à chaleur ; les flux sont respectivement $-0,2 \text{ W.m}^{-2}$ et $-0,6 \text{ W.m}^{-2}$ (à noter qu'en climat tropical, dans une stratégie de rafraîchissement, des flux négatifs correctement dimensionnés peuvent être prisés). Toutefois, ces deux complexes de toiture possèdent des comportements radicalement différents. En effet, la capacité en rétention d'eau par le substrat de la PCV_{ce}^{T_h} induit une évapotranspiration double de celle de PCV_{Lsa}^{T_h}. À contrario, la stratégie de cette dernière est basée principalement sur l'adduction externe, comme l'indique leurs ratios de BOWEN de respectifs $\beta_{ce} = 0,96$ et $\beta_{Lsa} = 3,14$. De plus, au-delà de l'intensité du flux traversant la tôle, il est à noter que leurs cinétiques sont opposées. Le comportement de la PCV_{Lsa}^{T_h} étant synchrone avec l'irradiation solaire, contrairement au comportement de la PCV_{ce}^{T_h} qui est asynchrone.

Les indices de performance utilisés pour caractériser les complexes de toitures étudiés sont au nombre de deux : le facteur de transmission et la résistance apparente. Ces choix sont issus de la compréhension intuitive de ces paramètres ainsi que de leurs reconnaissances chez les organismes de certification des matériaux (ici le CSTB).

En vue de permettre leurs utilisations, ces indicateurs intègrent des données ayant subi une moyenne mobile arithmétique dont la période est équivalente au déphasage observé. Employé sur un cycle circadien, deux plages de valeurs apparaissent : nocturnes et diurnes. Les cinétiques étant principalement influencées par l'irradiation solaire, les données nocturnes tendent vers une valeur constante, alors que les données diurnes tendent à évoluer (pseudo) linéairement.

2. Conception de référence pour une toiture à La Réunion.

3. Provenant principalement de l'impact des phénomènes de transpiration et d'évaporation

Sur la plage possédant une irradiation CLO brute supérieure à 500 W m^{-2} , le facteur de transmission solaire est de 0,004 pour la $\text{PCV}_{L_{sa}}^{Th}$. Il est par contre de -0,005 pour la PCV_{ce}^{Th} dû au flux négatif asynchrone. Étant inférieures à 0,02, ces valeurs permettent de considérer ces PCV comme conformes selon l'outil PERENE, et par conséquent la RTAA-DOM.

Sur la même plage temporelle, la résistance apparente obtenue pour la $\text{PCV}_{L_{sa}}^{Th}$ et la PCV_{ce}^{Th} sont de $0,70 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ et $0,62 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, contre $0,96 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ pour la toiture « tôle ». Dans les conditions de l'expérimentation, sur la base des données observées, les PCV montrent de bonnes performances, permettant d'améliorer les conditions de confort. Des études à échelle 1 sont nécessaires pour corroborer cette hypothèse.

En conclusion, les divers travaux entrepris permettent d'affirmer que les PCV ont la capacité de réduire les sollicitations thermiques (surchauffe) sur le territoire réunionnais. L'impact de celles-ci étant fonction du type (composition) de PCV étudié et des conditions météorologiques.

Les analyses effectuées permettent de valider la (faible) possibilité qu'une PCV induise une déperdition conduisant à une surconsommation énergétique (chauffage) en saison froide. Toutefois, cette situation est probable uniquement sous certaines conditions très particulières.

Définis pour une journée type de classe 1, les facteurs de transmission solaires sont de 0,004 et -0,005 respectivement pour la $\text{PCV}_{L_{sa}}^{Th}$ et la PCV_{ce}^{Th} . La valeur négative provenant du caractère asynchrone de cette dernière (comparativement à l'irradiation). Les résistances apparentes sont quant à elles de $0,70 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ et $0,62 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, respectivement pour la $\text{PCV}_{L_{sa}}^{Th}$ et la PCV_{ce}^{Th} . La performance légèrement supérieure de la $\text{PCV}_{L_{sa}}^{Th}$ contribue à justifier notre approche. À noter que l'indicateur R^* apparaît ne pas être suffisant pour caractériser l'impact des PCV, et le comparer à celui d'une toiture classique.

Enfin, une approche innovante a permis de développer un prototype (la $\text{PCV}_{L_{sa}}^{Th}$) adapté aux structures légères pour tous type de toiture. L'innovation ainsi proposée (exportable dans toute la ceinture tropicale) peut être exploitée sur la totalité du parc immobilier réunionnais. Ce faisant, elle a la capacité d'ouvrir un nouveau secteur d'activité : les PCV sur structures légères.

Les résultats présentés permettent de répondre aux questions (1) et (2) de la problématique. La résolution de la question (3) sera traitée par le biais de la modélisation ; objet du chapitre suivant.

Chapitre IV

Modélisation et Simulation

Chap.
IV

*« C'est parce que quelque chose
des objets extérieurs pénètre en
nous que nous voyons les formes
et que nous pensons. »*

ÉPICURE, LETTRE À HÉRODOTE

Sommaire du chapitre IV

1	Introduction	163
1.1	Objectifs	163
1.2	Stratégie de modélisation	163
2	Le système d'étude	167
2.1	Description physique	167
2.2	Phénoménologie	168
3	Position du problème et formalisme	173
3.1	Approche générale et hypothèses	173
3.2	Les transferts thermiques	176
3.3	Les transferts de masse	183
3.4	Les paramètres botaniques	193
3.5	Couplage des transferts de chaleurs et de masse	194
4	Modèles physiques	197
4.1	Représentation du système	197
4.2	Modèles thermiques	199
4.3	Modèles hydriques	201
4.4	Modèles hygriques	203
4.5	Synthèse de la représentation	204
4.6	Système d'équation et numérisation	208
5	Résolution et couplage	211
5.1	Présentation du code de calcul ISOLAB	211
5.2	Couplage des systèmes matriciels	212
5.3	Méthodes de résolution sous ISOLAB	214
5.4	Gestion des systèmes oscillants	216
6	Le code PcvBat	219
6.1	Stratégie	219
6.2	Couplage avec ISOLAB	220
7	Simulations	221
7.1	Procédure de vérification	221
7.2	Simulation des cas d'études	222
7.3	Éléments de validation	229
7.4	Perspectives	247
8	Synthèse	249

Approche

L'OBJECTIF de ce chapitre est de proposer une modélisation des PCV dans les conditions climatiques de l'île de La Réunion et adaptée à ses contraintes architecturales. Pour ce faire, la modélisation est basée sur les quatre systèmes expérimentés : tôle, substrat, PCV_{ce}^{Th} (gazon) et PCV_{La}^{Th} (liane).

Après le choix de la stratégie de modélisation, le système d'étude est décrit, permettant la présentation du formalisme des phénomènes considérés pour les transferts thermiques, hydriques et hygriques. Le modèle physique est alors établi suite à la conceptualisation du système, sur la base d'équations de bilan de flux énergétiques et massiques.

Une fois discrétisé le système d'état obtenu peut être implémenté dans un code de calcul dédié (PcvBÂT) intégré sous forme de module à la plateforme d'expérimentation numérique nodale ISOLAB (couplage *via* les conditions aux limites). À noter qu'une gestion de la résolution couplée des champs thermiques, hydriques et hygriques, ainsi que de leur convergence, est nécessaire.

Enfin, les simulations sont confrontées aux données expérimentales, permettant d'apporter des éléments de validation et d'introduire en perspective des axes de développement.

Résumé

Le modèle obtenu se distingue des modèles existants par la considération couplée des transferts thermique, hydrique et hygrique, mais aussi par une approche dynamique des précipitations. De plus, c'est le premier modèle créé qui soit spécifiquement adapté à l'île de La Réunion.

Afin de générer les modèles de PCV, un code de calcul dédié a été créé : PcvBÂT. Autonome, PcvBÂT est fort de 28 000 lignes de code, incluant l'interfaçage (choix interactif : géométrie, conception, phénomènes, modèles et paramètres), les sous-modèles implémentés et la génération automatique du fichier de modèle appelé par ISOLAB lors de la résolution. Aux vues du nombre de sous-modèles utilisés, la génération du fichier permet, entre autres, de simplifier la vérification du modèle, son archivage et une interprétation plus rapide.

Suite à l'implémentation, le couplage PcvBÂT/ISOLAB a été validé, permettant la présentation d'éléments de validation modèle/mesure pour lesquels le critère observé est la température de tôle. Considérant la dynamique des courbes et leurs erreurs, il ressort que chacun des modèles considère l'ensemble des phénomènes physiques prépondérants. Par ailleurs, les modèles de PCV possèdent une erreur circadienne moyenne inférieure à 10%, critère de validation communément admis en physique du bâtiment.

Ces éléments de validation ouvrent la voie à diverses perspectives en vue d'accéder à l'erreur associée au modèle (inhérente à son approche, ses hypothèses et concepts). Celle-ci permettant *in fine* de vérifier la précision de la prédiction afin qu'elle soit en adéquation avec celle d'un code nodal de thermique du bâtiment.

Section 1

Introduction

1.1 Objectifs

Les travaux de modélisation s'inscrivent dans la démarche scientifique du groupe thématique physique du bâtiment du laboratoire PIMENT ; qui consiste à développer une approche basée sur l'analyse phénoménologique. Celle-ci permet en outre la réduction des modèles [BOYER, 1999], ainsi que leurs généralisations à d'autres conditions climatiques. Elle consiste également, dans une logique de capitalisation, à l'intégrer les modèles développés aux logiciels du laboratoire : ISOLAB et CODYRUN.

1.2 Stratégie de modélisation

1.2.1 Choix du type de modèle

La caractérisation de l'état (thermique, *etc.*) d'un bâtiment est conditionnée par le champ associé dans l'espace continu le composant et borné par les limites physiques de la construction. Par définition, aussi fin et performant soit-il, un modèle reproduisant de manière exacte les phénomènes est un idéal ; le modèle traduit une réalité physique avec plus ou moins de précision : il y a perte d'information. Par ailleurs, le choix de la modélisation adaptée est nécessairement fonction de la précision des résultats souhaités.

D'un point de vue énergétique, la modélisation comportementale d'une PCV (et donc d'un bâtiment) consiste en l'écriture d'un ensemble de relations traduisant les phénomènes physiques en présence (transferts de masse, d'énergie et/ou de quantité de mouvement) au sein de la paroi et ses interfaces. Dans but de permettre des simulations réalistes, au-delà des phénomènes, il est nécessaire que le milieu soit également décrit (position et géométries du bâtiment, conditions météorologiques). Le milieu étant le support de l'expression des phénomènes en présence¹ ces deux descriptions sont intimement liées et donc couplées au sein du modèle.

Selon la précision de la prédiction souhaitée (et donc le temps de calcul associé), l'échelle de la discrétisation est déterminée. Elle conditionne la complexité des modèles utilisés et détermine le maillage du bâtiment. Nous distinguerons ici quatre types de modélisation pour un bâtiment, ils sont explicités ci-dessous par ordre croissant de finesse [WOLOSYN, 1999] et représentés par la figure 1.1 [BRANGEON, 2012]. Par définition, une « maille » constitue ici une entité élémentaire dont les propriétés thermo-physiques sont supposées homogènes.

1. Les modèles nodaux monozones, représentent le bâtiment par une unique maille thermique, donc un seul nœud. Ces modèles, sont très avantageux au niveau du temps calcul et

1. La composition, l'agencement, l'état de surface des parois, leurs expositions aux sollicitations météorologiques conditionnent les différents types de transferts en leurs seins, impactant les champs hydriques, hygriques et/ou thermiques du bâti *etc.*

intéressants pour avoir une vision globale sur le fonctionnement du bâtiment. Ils ne sont toutefois pas adaptés aux évaluations du confort thermique, car trop peu précis en termes de qualification des ambiances. Nous invitons le lecteur à consulter ALLARD [1998] pour plus de renseignements ;

2. Les modèles nodaux multizones, représentent chaque zone thermique par une maille ; où une zone thermique correspond à une pièce ou à un ensemble de pièces. Ils sont rapides et précis, de plus ils tiennent compte d'une répartition non uniforme des températures dans le bâtiment [BOYER, 1993]. Toutefois, les effets des sources de chaleur localisées (les radiateurs ou planchers chauffants), qui induisent une forte stratification thermique (paramètre important vis-à-vis du confort thermique), ne peuvent pas être considérés dus à l'approche homogène de la zone ;
3. Les modèles zonaux, sont basés sur un raffinement du maillage des modèles nodaux, permettant de définir plusieurs mailles dans une zone thermique, dépendant chacune d'une situation d'écoulement spécifique. Cette échelle permet de prendre en compte les phénomènes liés à l'écoulement de l'air tel que la stratification, les panaches thermiques, *etc.* [INARD et al., 1998] ;
4. Les codes de champ, caractérisés par une discrétisation très fine de la géométrie du bâtiment (plusieurs dizaines ou centaines de milliers de mailles), qui permettent de suivre en détail l'évolution des mouvements d'air et des températures à l'intérieur d'un volume.

Conditionné par la finalité du modèle, le choix du type de modélisation induit des répercussions sur les conditions de simulation, que ce soit au niveau des hypothèses de modélisation ou du temps calcul ; il impact également les résultats de simulations en termes de quantité d'information, de précision et donc leurs possibilités d'exploitations.

Par exemple, les modèles très détaillés, issus des codes de champs, sont généralement destinés à des analyses fines sur des systèmes d'études simples, dont les conditions aux limites sont connues avec précision. Les modèles plus simplifiés, tels que les multizones, sont plus adaptés à des systèmes d'étude complexes, dont les conditions aux limites sont le plus souvent variables [MIRANVILLE, 2002].

La finalité de notre étude étant la répercussion de l'usage d'une PCV sur le confort thermique² associé à un bâtiment, la modélisation multizonale du bâti est tout indiquée. Cette approche est explicitée par la figure 1.2.

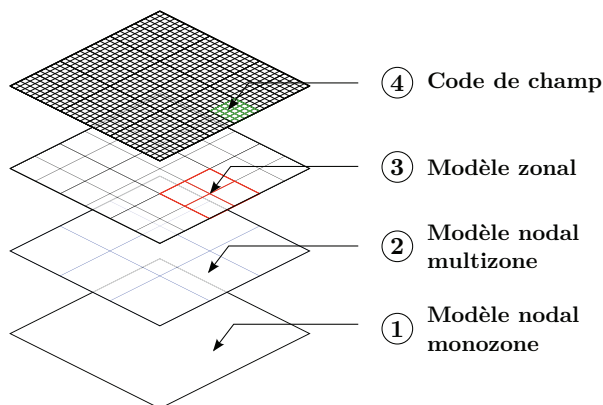


Figure 1.1 – Les types de maillages

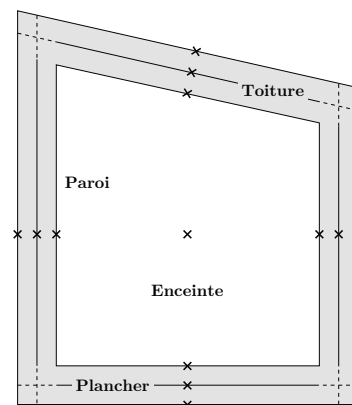


Figure 1.2 – Le maillage utilisé

1.2.2 L'environnement Isolab

Compte tenu de nos préoccupations, liées en particulier au comportement physique de parois complexes, notre choix s'est porté sur une modélisation de type multizone. Considérant le

2. Basé sur la précision des capteurs thermiques de l'épiderme humain, la précision souhaitée est de $\pm 1^\circ K$.

temps de mise en œuvre d'une telle plateforme³, la stratégie développée a consisté à s'appuyer sur un code de calcul existant au sein du laboratoire, dont la validation a été effectuée de manière logicielle (procédure BESTEST) et expérimentale : ISOLAB [MIRANVILLE, 2002]. Ce code de calcul thermo-hydro-aérolrique décrit les phénomènes en présence par des modèles physique de type semi-détaillé, résolu par un système matriciel linéaire inverse. Écrit en langage MATLAB⁴, il est développé depuis 2003 comme une plateforme d'expérimentation numérique dédiée à la simulation du comportement énergétique des bâtiments ; il fut notamment le support de plusieurs thèses [MIRANVILLE, 2002; BIGOT, 2011; GUICHARD, 2013]. Enfin, ce code a l'avantage de capitaliser les outils développés à ces fins, tels que l'analyse de sensibilité (méthode efast), l'optimisation paramétrique (couplage avec l'outil GenOpt), l'assimilation de donnée, mais aussi le tracé des diagrammes de confort (entre autres).

Pour toutes ces raisons, le code de calcul créé (PCVBÂT) est développé⁵ sous forme d'un module couplé à ISOLAB.

1.2.3 Le code de calcul dédié

La problématique faisant référence aux PCV_H de manière globale, d'une part, et l'expérimentation ayant mis en exergue deux PCV_H distinctes, d'autre part, le choix a été fait de créer un code de calcul multi-modèle et modulaire, générant⁶ le modèle nécessaire en fonction des besoins, donc du type de PCV étudié.

Du point de vue de la réalité physique, la mise en œuvre⁷ des couches non usinées de la PCV_H, induit des épaisseurs connues avec une erreur minimum de 1 cm (substrat, végétation extensive). De plus, en physique du bâtiment, la précision nécessaire des températures est de 1°C [MIRANVILLE, 2002]. De ce fait, afin d'avoir un modèle cohérent avec les attentes et les données accessibles, seuls les modèles portant sur les phénomènes les plus influents sont considérés.

Concernant la modélisation, les variables d'état de chacune des couches considérées sont obtenues *via* des bilans conservatifs de masse et d'énergie effectués à l'échelle mésoscopique. Les jonctions entre ces couches, donc entre ces modèles, sont prises en compte par le biais des conditions aux limites. Ainsi, les bilans permettent d'obtenir globalement les champs thermiques et massiques (liquide ou vapeur) de la PCV_H étudiée (la finesse de ce champ est fonction du pas de discrétisation spatial utilisé).

Enfin, vis-à-vis du couplage effectif avec ISOLAB, afin d'obtenir un système matriciel linéaire inverse, la structure (squelette) du modèle semi-détaillé est basée sur les phénomènes de diffusion (thermiques, hygriques et hydriques). La discrétisation des équations de bilans est alors effectuée par la méthode des différences finies selon le schéma d'EULER implicite au second ordre. Le système peut alors s'écrire⁸ sous la forme $[Me] \cdot [\Psi]^{t+1} = [Mi] \cdot [\Psi]^t + [S]$ et être couplé à ISOLAB. Dans le cas de phénomènes nécessitant un modèle non-linéaire vis-à-vis de $[\Psi]$, ceux-ci sont si possible linéarisés (couplage parfait). Dans le cas contraire, le modèle est couplé *via* le vecteur des sollicitations $[S]$ (couplage connecté).

3. Celle-ci permettant la gestion des transferts thermiques et massiques à travers les parois d'une zone et leurs interactions, mais également l'intégration des conditions météorologiques, *etc.*

4. Définit un langage de programmation de haut niveau reconnu par la communauté scientifique, dédié au calcul matriciel, développé par THE MATHWORKS. Il définit également un environnement de programmation adapté à la visualisation et à la recherche.

5. À noter que le code de calcul créé PCVBÂT, intégré à ISOLAB, est un module autonome (Cf. section 1).

6. L'aspect « générateur de fichiers de modèle » est défini section 6.

7. Remarque valide en laboratoire, et d'autant plus lors de l'installation des PCV_H par les entreprises du secteur du bâtiment.

8. Où $[\Psi]$ est le vecteur d'état thermique, hygrique ou hydrique. Équations définies section 5.

Section 2

Le système d'étude

Le paradigme inhérent à la conception du modèle est basé sur deux notions : le cadre contextuel abordé dans la section précédente et le système d'étude. Le système d'étude est défini par la description de la réalité physique du système, à partir duquel sont mis en exergue les phénomènes physiques en présence ainsi que les paramètres clefs associés.

2.1 Description physique

La notion de PCV étant volontairement un concept « ouvert », elle ne possède pas de description physique intrinsèque fixe. Elle est définie par un ensemble de couches dont l'ordre et la composition sont définis en fonction des besoins. De ce fait, il existe une multitude de combinaisons possibles. Afin de permettre une description physique adéquate et adaptée, une approche générique est utilisée. Modulaire, elle est basée sur l'agencement des quatre types de couches principales¹ susceptibles de composer une PCV : la structure, le substrat, la lame d'air et la canopée. Plus exactement, le système débute dans l'air extérieur, à une distance² définie en fonction de la végétation et des conditions locales, pour finir sur la face interne de la structure (le plafond). Ainsi, la sélection et l'organisation adéquate des couches de la PCV générique étudiée permettra de modéliser la PCV_{ce}^{Th} et la PCV_{lsa}^{Th} .

Nota : la différenciation des couches types (ex : canopée du gazon et de la liane) se fait *via* le choix spécifique d'un modèle ou bien *via* leurs paramètres. Tous deux, ainsi que le nombre de couches et leurs organisations sont définis dans PcvBât lors de la simulation (*Cf.* section 6).

La PCV_H peut donc être vue comme un milieu multicouche dont chacune possède des propriétés particulières et pouvant être discrétisées. Dans une approche de type semi-détaillée, ces propriétés sont déterminées (donc modélisées) afin de ne traduire que les phénomènes physiques les plus influents. Parmi ceux-ci, les plus complexes à prendre en considération³ sont approchés par des modèles simplifiés ou empiriques⁴.

La description des phénomènes présents est l'objet de la sous-section suivante.

1. *Nota* : l'éventuelle présence des couches de moindre importance d'un point de vue thermique n'est pas considérée dans cette approche. Il s'agit par exemple du géotextile, le filtre antiracinaire, le drain, le revêtement bitumineux, *etc.* Toutefois, leurs actions peuvent être prises en compte *via* les conditions aux limites de ces couches.

2. De l'ordre du mètre pour une PCV_H extensive classique.

3. Car induisant un temps de calcul important ou relevant d'une importante difficulté à traduire mathématiquement le phénomène considéré.

4. C'est typiquement le cas, dans le substrat, de la conduction thermique ou bien de la diffusivité hydrique.

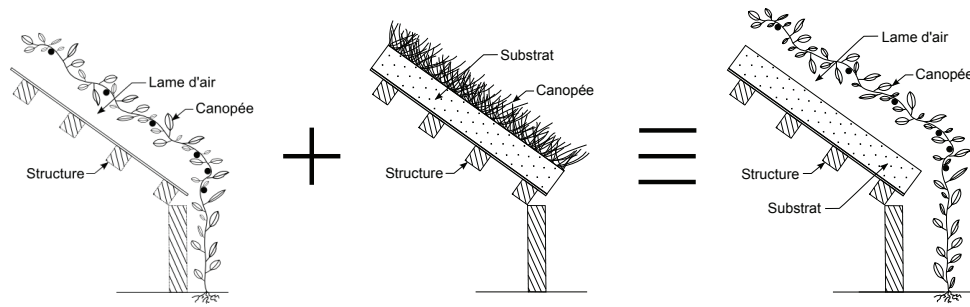


Figure 2.1 – Genèse de la PCV_H générique étudiée

2.2 Phénoménologie

L'étude thermique des PCV_H est à l'interface de diverses disciplines. Chacune d'entre elles impactant le système à travers divers phénomènes tels que les transports (mécanique des fluides, thermique, éclairagisme, hydrologie, *etc.*), le comportement des plantes (biologie végétale, biochimie) mais également l'interaction de ces dernières avec le monde vivant⁵ (microbiologie, écologie). Parmi tous ces domaines d'étude impactant le champ thermique seuls ceux possédant les phénomènes prépondérants sont considérés : il s'agit des transferts thermiques, et massiques.

La présence de l'évaporation, de la transpiration et d'une éventuelle condensation au sein du système d'étude induit une modification simultanée des champs thermique, hydrique (eau liquide) et hygrique (vapeur d'eau); ces champs sont donc liés. Considérant l'importance de l'impact du changement de phase sur le champ thermique (cible principale de notre étude), il est alors nécessaire de suivre l'évolution de chacun de ces champs. Les variables d'états associées sont respectivement la température⁶ (°C), la teneur en eau volumique, ou fraction volumique (ω) et le rapport de mélange ($m_{eau}^{vap}/m_{air}^{sec}$). Les phénomènes principaux affectant chacun de ces champs sont présentés par la figure 2.2, leurs descriptions sont effectuées dans les paragraphes suivants.

2.2.1 Les sollicitations extérieures

Les sollicitations extérieures impactent les couches du système étudié, *via* les transferts radiatifs de type GLO ainsi que par les sollicitations météorologiques (irradiation, température d'air, humidité relative, vitesse et direction du vent, nébulosité, *etc.*). Aux vues des interactions entre les sollicitations et la PCV, les échanges sont considérés spécifiquement au niveau des couches impactées (en surface ou en leur sein).

Par ailleurs, les transferts radiatifs de type GLO sont décrits par la loi de STEFAN-BOLTZMAN et donc caractérisés par la description physique des éléments présents autour du système d'étude (facteur de forme, émissivité, température). En général ces transferts sont associés à deux corps : la voûte céleste (température selon nébulosité) et l'environnement (supposé à la température de l'air extérieur).

2.2.2 L'air extérieur

L'air extérieur fait la jonction entre la cime de la canopée et l'environnement. L'épaisseur⁷ de cette pseudo-couche est généralement d'un mètre; elle a de plus la particularité de posséder

5. Au delà de la prédation, la symbiose des champignons sur les radicelles permettent à la plante de capter les nutriments et l'eau nécessaire à sa survie. Ce rôle induit la création de zones particulièrement humides autour des racines permettant ainsi l'apparition de canaux thermiques privilégiés.

6. Le choix d'une l'unité non conforme au système international (°C) est effectué afin de faciliter le couplage avec ISOLAB

7. L'épaisseur est fonction du profil de température dans l'air au dessus de la canopée, elle correspond à la position où $T_{air} = T_{air}^{ext}$.

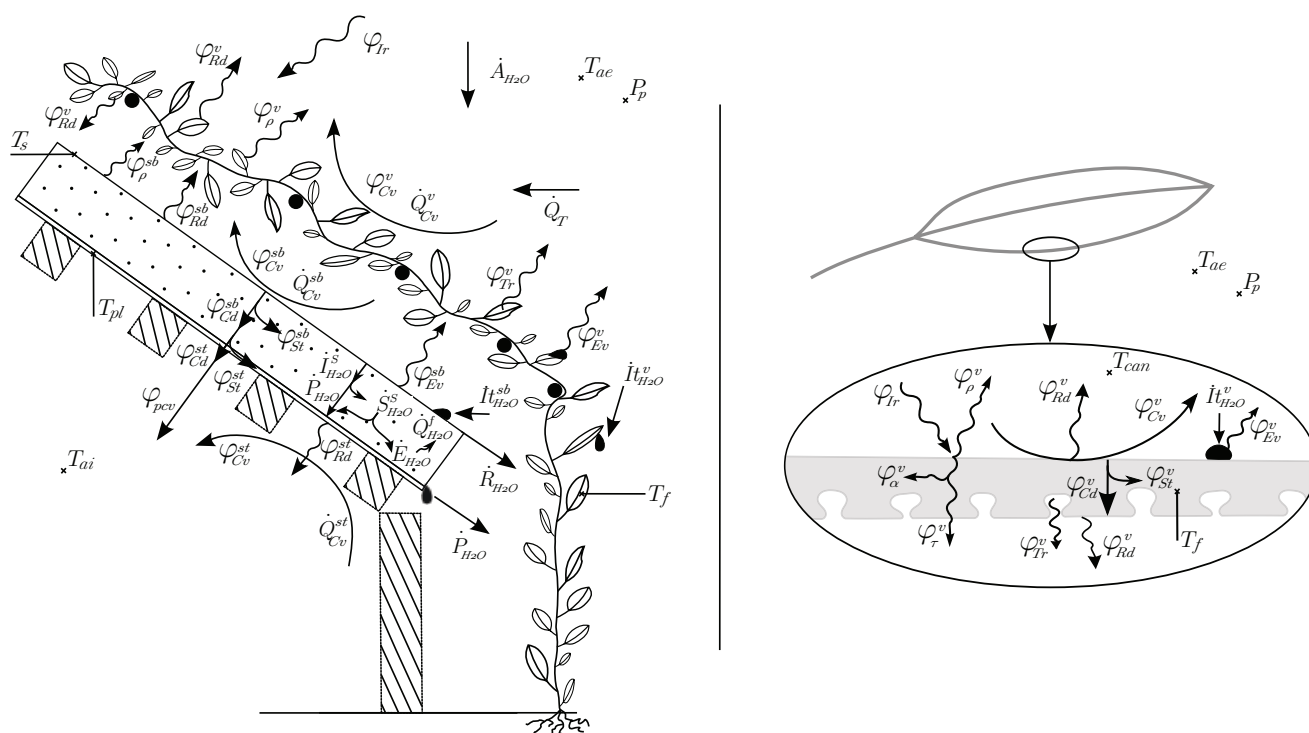


Figure 2.2 – Les phénomènes en présence considérés dans la PCV_H étudiée.

une continuité matérielle à ses limites. L'évolution de la température et de la teneur en eau dans l'air extérieur est due aux phénomènes de diffusion, d'advection et de convection (si au contact d'une surface), ainsi qu'aux évolutions météorologiques.

Nota : Dans les modèles de PCV cette couche est classiquement négligée. Seuls quelques auteurs la considèrent [ALEXANDRI et JONES, 2007; HODO-ABALO et al., 2012].

2.2.3 La canopée

La cime de la canopée est en contact direct avec l'air extérieur et de fait l'environnement. L'évolution de la température et de la teneur en eau dans la canopée sont dues aux phénomènes de diffusion et de convection (thermique et massique), mais aussi à la transpiration ainsi qu'aux évolutions météorologiques.

— *Considérations structurelles* —

Structurellement, la canopée est un milieu spécifique difficile à modéliser⁸. De ce fait, elle est classiquement modélisée *via* une approche simplifiée définie à l'échelle de la canopée : la méthode grande feuille⁹ ou bien la méthode de la résistance équivalente (issu de l'analogie thermo-électrique). Seuls quelques modèles¹⁰ utilisent une approche basée sur une discrétisation plus fine [ALEXANDRI et JONES, 2007; HODO-ABALO et al., 2012].

En ce qui concerne la finesse de l'approche, il s'avère que la canopée ne peut pas être consi-

8. La complexité structurelle (milieux diphasique, enchevêtrement des feuilles) rend le milieu fortement non-homogène et non isotrope. Il possède de plus un caractère évolutif potentiellement important (aspects botaniques, zoologiques, fongiques, et autres stress hydriques *etc.*). En conséquence, la finesse et l'étendue des phénomènes nécessaires à la modélisation précise du champ thermique rendent cette dernière très complexe.

9. La canopée est considérée comme une unique grande feuille (horizontale) couvrant le substrat, simplifiant les aspects radiatifs et convectifs principalement.

10. Parmi ces modèles, celui proposé par HODO-ABALO et al. n'est pas utilisé, car il ne respecte pas les objectifs (il modélise la canopée *via* l'équation de NAVIER-STOCKES). Le modèle d'ALEXANDRI et JONES quant à lui correspond à nos besoins : il est semi-détaillé. Il est alors modifié afin de prendre en considération la convection forcée.

dérée comme un milieu homogène sans perte préjudiciable quant à la précision des résultats [ALEXANDRI et JONES, 2007]. Dès lors, en fonction du type de transfert considéré, la canopée est considérée comme un milieu semi-transparent (transfert radiatif) ou bien comme un milieu diphasique composé de deux couches parallèles : l'air et les feuilles.

— *Transferts sensibles et latents* —

Les phénomènes de convection, d'irradiation et de transpiration sont prépondérants dans cette couche. Leurs approches sont succinctement présentées.

- La convection est modélisée par l'équation de NEWTON (Cf. Tab. 2.6), pour laquelle le coefficient de convection est généralement explicité en fonction de la résistance aérodynamique (r_a) dont l'expression (empirique) est propre à chaque étude.
- Pour ce qui est de l'irradiation, la présence du feuillage induit un caractère semi-transparent à la canopée. Cette caractéristique étant extrêmement complexe à modéliser finement, l'approche du phénomène est faite selon un modèle empirique. Il s'agit de la loi de BEER-LAMBERT, permettant d'obtenir de manière discrète le flux radiatif transmis à travers la canopée spécifiquement pour les rayonnements CLO et GLO. La canopée est dès lors caractérisée par le LAI et par le coefficient d'extinction (fonction de l'orientation des feuilles)
- Enfin, pour les modèles semi-détaillés les plus performants, la transpiration¹¹ est classiquement approchée par une équation similaire à l'équation de NEWTON (Cf. Tab. 2.6). Elle est gouvernée par trois grandeurs : la pression partielle en eau (e_a), la résistance aérodynamique massique (r_m^c) et le degrés d'ouverture de l'ostiole. Variable difficile à modéliser, le degré d'ouverture de l'ostiole est exprimé à travers la résistance stomatique (r_{st}). La résistance stomatique définit la résistance au passage de la vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur de la feuille. *Nota* : Il est souvent fait l'hypothèse que $r_m^c \equiv r_t^c$.

2.2.4 La lame d'air

Située entre la canopée et le substrat, la lame d'air est un milieu fluide ayant la particularité de posséder une continuité matérielle à sa limite supérieure (canopée) et une possible continuité matérielle à sa limite inférieure (selon le type et considération du substrat).

Comme pour l'air extérieur, l'évolution de la température et de la teneur en eau dans la lame d'air sont dues aux phénomènes de diffusion et de convection (thermique et massique), ainsi qu'aux évolutions météorologiques. Toutefois, ces facteurs sont fortement impactés par la présence de la canopée (facteur limitant les transferts).

2.2.5 Le substrat

— *Transferts au sein du substrat* —

Dans le substrat, les bilans massiques et thermiques possèdent une certaine similarité. En effet, tous deux sont le fruit de trois phénomènes : la diffusion (thermique et massique), le stockage (thermique et massique) ainsi que l'évaporation.

À noter que la modélisation fine du substrat, milieu poreux, n'est pas effectuée au profit de modèles semi-empiriques, permettant d'acquérir les conductivités et diffusivités thermique, hydrique et hygrique. Par ailleurs, il s'avère qu'il n'existe actuellement aucun modèle physique semi-détaillé pour ces variables, l'inhomogénéité et la porosité du substrat rendant particulièrement complexe la modélisation des phénomènes de transfert.

— *Transferts aux limites du substrat* —

La surface du substrat est caractérisée par un nombre important de phénomènes physiques.

11. Il existe néanmoins d'autres modèles non présentés ici, car ne correspondant pas à l'approche souhaitée (trop ou pas assez détaillé) Cf. [HODO-ABALO, 2013].

D'un point de vue thermique, les transferts radiatifs sont à prendre en considération en fonction du taux de couverture de la canopée et de l'homogénéité de celle-ci (présence de trous ou non). Les phénomènes de convection thermique et massique à la surface du substrat sont comptabilisés par le biais de la définition des résistances de contact thermique et massique (r_t^s et r_m^s), grandeurs intégrant les notions de rugosité du substrat, de teneur en eau, de hauteur de la canopée ou de vitesse du vent selon le type de convection considéré.

L'évaporation est également obtenue par le biais de la résistance massique de contact associée à la résistance aérodynamique massique. Son moteur est le gradient maximal de pression partielle en eau dans l'air (donc e_a^{sat} est considéré). Le volume évaporé est alors obtenu par le biais de l'enthalpie de vaporisation.

Le bilan massique à la surface de la canopée prend en compte l'eau apportée par irrigation et précipitations (\dot{A}_{H_2O}) ainsi que l'eau interceptée par la végétation ($\dot{I}_{H_2O}^v$), stockée en surface ($\dot{I}_{H_2O}^{sb}$), ruisselée ($\dot{R}_{H_2O}^{sb}$) et les pertes par évaporation (\dot{E}_{H_2O}). Le nœud de surface tenant compte des phénomènes dans le substrat et dans l'air à son contact, il est nécessaire de tenir compte des pertes par convection massique et thermique. À noter que la PCV_H est localisée sous un climat tropical humide, ce qui induit l'absence de couverture neigeuse ou de gel du substrat durant la l'hiver. En face interne, dans le cas où le substrat est saturé et que l'eau infiltrée puisse être évacuée par gravité, il y a percolation (\dot{P}_{H_2O}). Enfin, le transfert de l'eau libre à travers la face interne du substrat, où remontées capillaires, est également une possibilité, elle dépend du potentiel hydrique du matériau (ψ_s).

2.2.6 La structure

En face interne de la structure, donc de la PCV, se trouve l'enceinte du bâtiment. Les transferts thermiques présents sont de types convectifs et radiatifs (GLO). La paroi étant solide et non poreuse, les seuls transferts massiques possibles sont de types hygroscopiques et capillaires. L'épaisseur du matériau concerné par ces remontées capillaires dépend du potentiel hydrique du matériau (ψ_s). Enfin, les risques d'eau liquide (*via* la condensation) sur la surface existent, ces changements de phase influent simultanément sur le champ observé, liant les champs thermique, hydrique et hygrique.

En face externe de la structure, l'interface avec le substrat est dans la réalité composée de diverses couches dont un film étanche, afin de protéger la structure des infiltrations d'eau. Ainsi, à l'interface structure/substrat le champ thermique est continu alors que les champs hydriques et hygriques sont discontinus. La teneur en eau à cette interface (côté substrat) impacte donc uniquement le champ thermique, par pertes sensibles et possiblement latentes.

2.2.7 Les sollicitations intérieures

À l'instar des sollicitations extérieures, les sollicitations intérieures influent sur les couches accessibles. Il s'agit uniquement de la surface interne de la structure dans la configuration actuelle. D'un point de vue thermique, les sollicitations intérieures sont de deux types : radiative et convective. Elles sont donc liées aux propriétés du fluide (température, humidité relative et vitesse au contact de la paroi) et à celle des autres parois (température, émissivité, facteur de forme). D'un point de vue massique, la seule¹² propriété observée est de type hygrique : l'humidité relative.

12. Il est considéré qu'il n'y a pas de projection d'eau liquide sur la paroi (face interne de la PCV).

Section 3

Position du problème et formalisme

Le paradigme étant défini par les deux sections précédentes, il est alors possible d'explicitier la position du problème puis son formalisme. Cet aspect primordial est effectué à travers la description des équations génériques propres aux phénomènes thermiques, hydriques et hygriques considérés pour la paroi complexe. Le couplage de ces phénomènes à leurs champs respectifs, ainsi que leurs impacts sur le champ thermique est ensuite abordé.

3.1 Approche générale et hypothèses

Afin de décrire la position du problème il est nécessaire de définir le formalisme de la modélisation utilisée, ainsi que les grandeurs observées (champs et transports). Puis, ces considérations étant posées, la méthode d'homogénéisation est présentée et les hypothèses utilisées sont énumérées.

— *Modélisation : le système d'état* —

La prédiction de l'évolution thermique d'une PCV peut se faire selon diverses approches, allant des modèles physiques empiriques à détaillés, en passant par simplifiés et semi-détaillés. En physique du bâtiment, les modèles détaillés sont des modèles dits « de transfert » ; ils utilisent le principe de superposition et le calcul opérationnel. Par opposition, les modèles semi-détaillés sont souvent des modèles « d'états » [BERGES, 1986]. À l'instar des modèles de transfert, ils sont constitués d'une équation de bilan, mais après simplification spatiale et phénoménologique, ils sont réécrits afin d'explicitier l'évolution de la grandeur d'état observée, *i.e.* la dérivé partielle en temps (de la température, pression, *etc.*). Ils sont par ailleurs généralement exprimés à une dimension sous forme de dérivés partiels (pas d'opérateurs). Une fois discrétisées ces équations aboutissent à un système linéaire, potentiellement inverse (explicité section 5). Basé sur les grandeurs d'état, ce système matriciel est alors appelé « système d'état ». Les vecteurs contenant les grandeurs d'état à chaque pas de temps sont appelés les vecteurs d'état ; concaténés ils forment une matrice explicitant l'évolution du champ associé au système étudié.

Au regard de la précision souhaitée, la stratégie de modélisation explicitée indique l'utilisation de modèles d'état et induit les hypothèses suivantes :

1. Les transferts sont unidimensionnels¹ et s'expriment selon l'axe perpendiculaire au plan formé par la paroi (noté axe z) ;
2. Il y a continuité du champ thermique selon l'axe z sur toute la PCV_H ;

1. Considérant l'homogénéité des transferts dans le plan et la prépondérance des flux orthogonaux au plan.

3. Il y a continuité des champs hydriques et hygriques selon l'axe z sur toute la PCV_H sauf à l'interface substrat/structure.

— Unité des grandeurs observées —

Les champs observés dans la présente étude sont au nombre de trois : le champ thermique, le champ hydrique et le champ hygrique. Les unités associées ainsi que les domaines occupés sont explicités ci-dessous. À noter que dans une modélisation basée sur « l'état » du système, les variables sont de type intensif, alors qu'elles sont de type extensif pour les modèles basés sur les transferts². Les champs ont donc été définis pour des variables intensives dont les unités ont été choisies avec attention³.

- le champ thermique
le champ thermique s'étend sur tout le domaine d'étude, il a pour grandeur la température (T) dont l'unité du système international est le kelvin [K]. Toutefois, en physique du bâtiment (en France) l'unité la plus utilisée est le degré Celsius [°C], raison pour laquelle ISOLAB utilise cette dernière. L'unité utilisée est alors le degré Celsius.
- le champ hydrique
L'eau liquide pouvant être présente dans, ou sur, toutes les couches⁴, le champ hydrique est défini sur tout le domaine. Toutefois, considérant la densité de l'eau liquide, celle-ci se concentre généralement dans les couches matérielles (solides) ou à leurs surfaces. L'unité internationale associée à la masse est le kilogramme [kg], mais celle-ci est intensive. Une possibilité, couramment utilisée, est de définir l'eau liquide en présence sous la forme de teneur en eau volumique, ou fraction volumique (ω). La fraction volumique est définie par le rapport du volume d'eau sur le volume d'eau pouvant être contenu dans le milieu à saturation ($\omega = V_{H_2O}/V_{H_2O}^{sat}$). À noter que dans le cas d'une continuité hydrique entre deux milieux (notés 1 et 2), cette approche ne permet pas la continuité du champ à l'interface de ces deux couches matérielles (car $V_{H_2O,1}^{sat} \neq V_{H_2O,2}^{sat}$). Dans ce cas, la relation liant ces fractions à l'interface est définie par : $\omega_2 = \omega_1 [V_{H_2O,1}^{sat}/V_{H_2O,2}^{sat}]$. Cette grandeur sans unité est comprise sur la plage $[0, 1]$.
- le champ hygrique
Enfin, le champ hygrique est également défini sur tout le domaine. L'unité conventionnellement utilisée lors des études psychrométriques est le rapport de mélange (W). Sans unité, il est défini par le rapport de la masse de vapeur d'eau sur la masse d'air sec dans un même volume ($W = M_{vap}/M_{air}^{sec}$). Cette grandeur est également utilisée par ISOLAB. Cette grandeur est sans unité et comprise sur la plage $[0, +\infty[$.

Les transports au sein du système d'étude sont de deux types : énergétiques et massiques. Cependant, les comportements spécifiques des formes liquides et vapeurs, ainsi que les impacts thermiques associés aux changements d'état, nous amènent à scinder le transport massique et à considérer deux transports distincts : hydrique et hygrique. Ainsi, trois transports sont observés : énergétique, hydrique et hygrique.

- le transport énergétique est une densité de flux (φ) exprimé en $[W.m^{-2}]$;
- le transport hydrique est un débit volumique⁵ (\dot{X}_{H_2O}) initialement exprimé en $[m^3.s^{-1}]$. Afin, d'être cohérent avec les volumes stockés en surface (des feuilles, substrat, etc.) Celui-ci est déprécié au profit de $[m^3.m^{-2}.s^{-1}] \equiv [m.s^{-1}]$. À noter qu'en météorologie cette grandeur est couramment exprimée en $[mm.s^{-1}]$.
- le transport hygrique est un débit massique (Q). Il est exprimé en $[kg.m^{-2}.s^{-1}]$.

2. Puisque ceux-ci sont basés sur les propriétés de conservation, qui sont associés à cinq grandeurs : l'énergie, la quantité de mouvement, la quantité de matière, la charge ou l'étrangeté.

3. Notamment vis-à-vis de la compatibilité avec ISOLAB.

4. Dans certaines conditions de température et de pression l'eau liquide peut être présente dans l'air, stable, sous forme d'aérosol.

5. Où X est remplacé par la lettre adéquate selon le flux considéré.

— Homogénéisation —

Parmi les milieux présents dans les cas d'études, les substrats et les végétaux possèdent un très grand nombre d'hétérogénéités⁶. En l'état, la modélisation des processus physiques les concernant est extrêmement complexe. Il est donc nécessaire d'homogénéiser ces deux types de milieux, *i.e.* les assimiler à des milieux continus équivalents possédant, d'un point de vue macroscopique, le même comportement moyen. Considérant la finesse du modèle final nécessaire, nous utiliserons la méthode de l'homogénéisation⁷ par prise de moyenne volumique.

— Les hypothèses —

Tout système d'étude est considéré à travers des hypothèses simplificatrices. Dans une approche semi-détaillée, leur sélection est présentée ci-dessous. Pour plus de clarté, celles-ci sont énumérées en fonction des couches auxquelles elles s'appliquent.

Liste des hypothèses liées à l'air extérieur :

1. L'air est considéré exempt d'eau sous forme d'aérosols (liquide ou solide) ;
2. Les effets Soret⁸ et DuFour⁹ sont négligés ;
3. Les caractéristiques thermiques de l'eau ($c_{p,e}$) et de l'air ($c_{p,a}$, λ_a) sont considérés constants (impact de ω_a négligé) ;
4. Les caractéristiques massiques de l'air (ρ_a , D_a) sont considérés constantes.

Liste des hypothèses liées à la canopée :

1. La canopée est considérée comme un milieu semi-transparent diphasique pour les transferts massiques et pour les transferts radiatifs (différenciation des rayonnements CLO et GLO) ;
2. Le ciel, la surface du substrat et la canopée sont considérées comme des plans parallèles de surface infinie ;
3. Le transfert thermique par conduction à travers le pétiole est considéré négligeable ;
4. La distribution d'eau sur la canopée est homogène ;
5. L'air au contact des feuilles est à saturation en vapeur d'eau ;
6. Il n'y a pas de stress hydrique ;
7. Il n'y a pas de stress dû à la prédation, parasites, ou autre facteur pouvant altérer leurs fonctions, leur potentiel d'évapotranspiration, leurs propriétés radiatives ou l'ombre portée qu'elles génèrent ;
8. Les plantes sont considérées en pleine santé et au paroxysme de leurs développement ;
9. Les rythmes (saisonniers, circadiens, etc.) des plantes sont négligés, l'évolution des plantes est alors supposée nulle (LAI constant) ;
10. Les grandeurs thermiques de la plante (ρ_f , $c_{p,f}$, λ_f) et de l'air (ρ_a , $c_{p,a}$, λ_a) sont considérées constantes ;
11. Les gains d'énergie induits par les réactions biochimiques au sein des végétaux sont considérés négligeables ;
12. La distribution verticale de la canopée est homogène ;
13. Les caractéristiques des plantes (LAI, df , τ_{can} , ρ_f , σ_c) sont considérées constantes ;
14. Le taux de couverture est considéré à 100% (pas de rayonnement direct sur le substrat) ;
15. Lors de l'interception, le rayonnement GLO est intégralement absorbé par le tissu foliaire

6. La notion d'hétérogénéité doit être associée à une échelle (ici il s'agit de $5 \cdot 10^{-3} m$ à $5 \cdot 10^{-2} m$ selon le milieu), car le niveau atomique étant hétérogène par définition, tout matériau est hétérogène si celui-ci est observé à une échelle suffisamment petite.

7. Méthode explicitée dans l'annexe E.

8. Phénomène également appelé thermodiffusion : transfert de masse dû à un gradient de température.

9. Pendant de l'effet Soret : phénomène de transfert thermique dû à un gradient de concentration.

$$(\alpha = 1, \rho = 0, \tau = 0).$$

Liste des hypothèses liées à la lame d'air :

1. L'air est considéré exempt d'eau sous forme d'aérosols (liquide ou solide) ;
2. Les effets Soret et Dufour sont négligés ;
3. Les caractéristiques thermiques de l'eau ($c_{p,e}$) et de l'air ($c_{p,a}$, λ_a) sont considérées constantes (impact de ω_a négligé) ;
4. Les caractéristiques massiques de l'air (ρ_a , D_a) sont considérées constantes.

Liste des hypothèses liées au substrat :

1. Les propriétés thermiques (ρ_s , $c_{p,s}$, λ_s) sont supposées constantes¹⁰ ;
2. Le substrat est considéré sans présence de paillis à sa surface ;
3. L'épaisseur du substrat est constante ;
4. L'érosion et la compression du substrat sont inexistantes ;
5. La composition est supposée homogène et isotrope ;
6. La rugosité est supposée constante ;
7. L'eau absorbée par les plantes est supposée prélevée de manière homogène dans toute la couche du substrat ;
8. Les apports en eau sont considérés sans influence notable sur le champ de température (chaleur sensible) ;
9. Il n'y a jamais de saturation (pas de stockage gravitaire : l'eau non retenue percole).
10. L'arrosage effectué est de type aérien.

Liste des hypothèses liées à la structure :

1. Les propriétés thermiques (ρ_b , $c_{p,b}$, λ_b) sont supposées constantes (impact de ω_b négligé) ;
2. L'étanchéité à l'interface substrat/structure est considérée parfaite ;
3. L'ensemble des couches d'étanchéité, filtre antiracinaire et drain sont supposés ne pas impacter la température ;
4. À l'interface, la diffusion massique (dans l'air) est négligée au regard de la convection ;
5. La convection naturelle est négligée au profit de la convection forcée si celle-ci est plus importante.

3.2 Les transferts thermiques

Cette section détaille les différentes relations utilisées pour la modélisation thermique d'une PCV dans un bâtiment¹¹. Elles traduisent les multiples phénomènes physiques qui conditionnent le comportement énergétique du système.

À noter que les transferts thermiques issus des transferts hydriques et hygriques sont traités dans la section 3.5 définissant les couplages inter-champs. Il s'agit ici de la condensation, de l'évaporation, de l'advection et de la transpiration.

3.2.1 Les phénomènes considérés

Dans une couche matérielle (*i.e.* solide) se trouve la diffusion (φ_{Dt}^m), le transfert aéraulique (si milieu poreux, φ_A^m) l'évaporation (φ_{Ev}^m), la condensation (φ_{Cd}^m), le stockage (φ_{St}^m) et la production (φ_P^m). Dans une couche fluide se trouve en plus l'advection (φ_{Ad}^f). De plus, à l'interface d'une couche matérielle et d'une couche fluide se trouve la convection (φ_{Cv}^d), le rayonnement (φ_{Rd}^d), l'évaporation (φ_{Ev}^d) et la condensation (φ_{Cd}^d). Enfin, la présence de végétation induit de plus la

10. L'impact de ω_s se fait sur le mélange substrat + eau (ρ_{se} , $c_{p,se}$, λ_{se}).

11. Pour une modélisation à l'échelle du bâtiment (multizone) se référer à MIRANVILLE [2010]

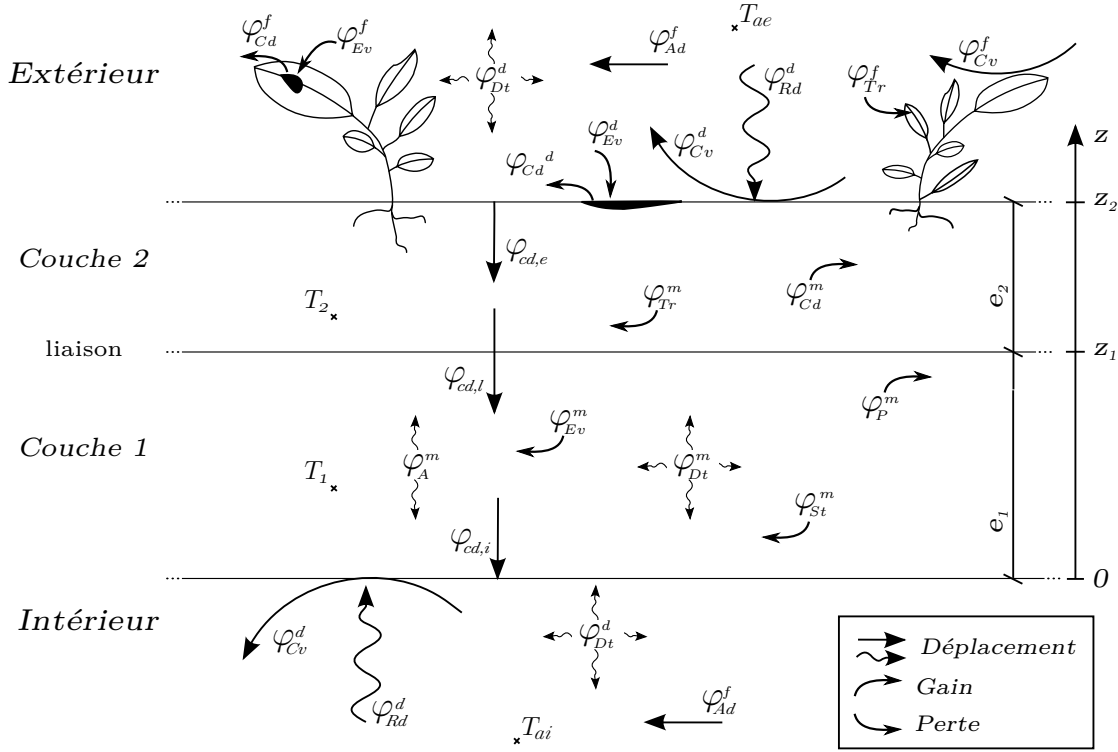


Figure 3.1 – Formalisme des transferts thermiques considérés à travers une paroi simple bicouche.

transpiration, qu'elle soit localisée dans le milieu matériel (φ_{Tr}^m), ou bien dans un fluide (φ_{Tr}^f). La figure 3.1 en explicite le formalisme. Dans une approche générale et dans l'optique d'alléger la lecture, la conceptualisation proposée par cette figure concerne une PCV_H générique. Les conceptualisations spécifiques aux quatre cas d'études sont présentées dans la section suivante.

3.2.2 L'équation de transfert

— Couplage des transferts thermiques —

Obtenu à partir du bilan énergétique, le couplage des phénomènes de transferts thermiques au sein d'une couche est proposé par l'équation 3.1. Son utilisation nécessite, si besoin, une simplification des termes non nécessaires pour la couche étudiée.

$$\varphi_{St} = \varphi_{Rd} + \varphi_{Cd} + \varphi_P + \varphi_{Ad} + \varphi_{Dt} - \varphi_{Ev} - \varphi_{Tr} - \varphi_{Cv} \quad (3.1)$$

— Cas du milieu continu —

Dans une approche basée sur la conservation de l'énergie, la mise en équation des flux thermiques considérés, citée précédemment, permet d'obtenir une équation de bilan : l'équation de la chaleur (eq. 3.2). En supposant le transfert monodimensionnel¹² selon l'axe Oz , la formulation est définie par l'équation 3.2, où P est un terme source.

Nota : Dans le cas d'un milieu fluide, l'impact thermique du phénomène d'advection (φ_{Ad}^f) est considéré comme un terme source.

$$\rho c_p \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} + P \quad \Leftrightarrow \quad \varphi_{St}^t = \varphi_{Dt}^t + \varphi_P^t \quad (3.2)$$

12. Aux vues des rapports d'allongements d'une paroi des bâtiments (rapport de l'épaisseur sur la hauteur ou la largeur) le transfert est considéré perpendiculaire à la paroi.

Compte tenu des dérivées partielles du premier ordre en temps et du deuxième ordre en espace, cette équation nécessite une condition aux limites temporelle et deux conditions aux limites spatiales. Elles sont énoncées ci-dessous, où $\varphi_{cd,i}$, $\varphi_{cd,l}$ et $\varphi_{cd,e}$ correspondent respectivement aux flux aux interfaces interne, liaison et externe.

Couche 1		Couche 2
$CI_1 : T(z, 0) = T_1^0 \quad (3.3)$		$CI_2 : T(z, 0) = T_2^0 \quad (3.6)$
$CL_i : -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T(0,t)}{\partial z} = \varphi_{cd,i}^t \quad (3.4)$		$CL_{li} : -\lambda_2 \cdot \frac{\partial T(z_1,t)}{\partial z} = \varphi_{cd,l}^t \quad (3.7)$
$CL_{li} : -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T(z_1,t)}{\partial z} = \varphi_{cd,l}^t \quad (3.5)$		$CL_e : -\lambda_2 \cdot \frac{\partial T(z_2,t)}{\partial z} = \varphi_{cd,e}^t \quad (3.8)$

Avec $\varphi_{cd,i} = \sum_j \varphi_{j,i} = \varphi_{Cv,i}^d + \varphi_{Rd,i}^d + \varphi_{Rd,i}^d + \varphi_{Cd,i}^d - \varphi_{Ev,i}^d$. L'approche est identique pour la face externe ($\varphi_{cd,e}$).

Nous pouvons alors distinguer trois types de nœud : les nœuds de surface, les nœuds internes et les nœuds de liaison entre couches. Les températures des nœuds de surface sont régies par les relations décrivant les conditions aux limites sur les faces extérieures et intérieures de la paroi. Elles sont dès lors conditionnées par les sollicitations issues de l'ambiance intérieure et de l'environnement extérieur.

Les températures des nœuds internes sont issues de la discrétisation spatiotemporelle de l'équation de la chaleur (eq. 3.2). Enfin, la température du nœud de liaison est donnée quant à elle par l'écriture de la conservation du flux de chaleur entre les deux couches selon le principe de conservation de l'énergie. Deux approches sont possibles : statique ou dynamique, respectivement nommées conditions aux limites de type NEUMAN liaison statique (Nls) et NEUMAN liaison dynamique (Nld).

Classiquement utilisée, l'approche statique (Nls) est issue de la conservation du flux de chaleur entre les deux couches selon le principe de conservation de l'énergie, sans considération de l'inertie thermique. Elle est ici exprimée sous sa forme unidimensionnelle (eq 3.9).

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T(z_1, t)}{\partial z} \right|_1 = \lambda_2 \left. \frac{\partial T(z_1, t)}{\partial z} \right|_2 \quad (3.9)$$

Spécifiquement développée pour PcvBât, l'approche dynamique (Nld) est également basée sur un bilan énergétique, mais considérant les termes sources et inertiques (eq. 3.10). Plus précisément, d'un point de vue mathématique, l'interface entre les deux couches est positionnée entre deux sous-maille virtuelles (Ω_1 et Ω_2). Chacune des sous-mailles (espace de SOBOLEV $H(div; \Omega)$) est alors le siège d'un bilan de flux basé sur la conservation de l'énergie. Par définition, le bilan de la maille virtuelle globale est la somme des bilans issus de ses sous-mailles, ce qui explique la forme de l'équation obtenue. Considérant le contexte de l'étude, le bilan sur le nœud de liaison est exprimé sous sa forme unidimensionnelle, où P_1 et P_2 sont les termes sources des couches 1 et 2.

$$\left. \frac{\partial T(z_1, t)}{\partial t} \right|_1 + \left. \frac{\partial T(z_1, t)}{\partial t} \right|_2 = \frac{\lambda_1}{(\rho c_p)_1} \left. \frac{\partial^2 T(z_1, t)}{\partial z^2} \right|_1 + \frac{\lambda_2}{(\rho c_p)_2} \left. \frac{\partial^2 T(z_1, t)}{\partial z^2} \right|_2 + \frac{P_1}{(\rho c_p)_1} + \frac{P_2}{(\rho c_p)_2} \quad (3.10)$$

L'avantage de l'approche dynamique est de conserver l'homogénéité de l'ordre spatial dans le système. Basée sur les concepts mathématiques et physiques utilisés pour la définition de l'équation de la chaleur, l'approche dynamique est une généralisation pour un nœud localisé à l'interface de n couches (ici au nombre de 2). À noter que dans le cas où les matériaux des

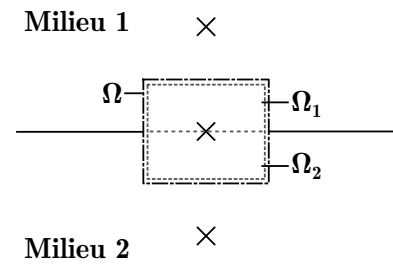


Figure 3.2 – Approche CL type Nld

couches 1 et 2 sont identiques, la réécriture¹³ de l'équation 3.10 permet d'obtenir l'équation 3.2.

— *Cas du milieu poreux* —

Dans le cas d'un milieu poreux, le déplacement du fluide dans la matrice induit un transfert thermique potentiellement non-négligeable. Suite à une homogénéisation par prise de moyenne volumique, les champs thermiques associés à un fluide non visqueux et à une matrice peuvent être exprimés par les équations 3.11 et 3.12, respectivement [NIELD et BEJAN, 2013]. Sous l'hypothèse¹⁴ d'une température locale identique pour la matrice et le fluide il vient¹⁵ : $\langle T_f \rangle = \langle T_s \rangle = \langle T \rangle = T$; ce qui permet de considérer un unique champ thermique (eq. 3.13). Celui-ci est défini en posant : ζ (eq. 3.11) + $(1 - \zeta)$ (eq. 3.12), où ζ est la porosité du milieu.

$$(\rho c_p)_f \left[\frac{\partial T_f}{\partial t} - \vec{v} \cdot \nabla T_f \right] = \lambda_f \nabla^2 T_f + P_f \quad (3.11)$$

$$(\rho c_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T_s + P_s \quad (3.12)$$

$$(\rho c_p)_{sf} \frac{\partial T}{\partial t} - (\rho c_p)_f \vec{v} \cdot \nabla T = \lambda_{sf} \nabla^2 T + P_{sf} \quad (3.13)$$

Où P est un terme source, en $W.m^{-3}$ et \vec{v} est le vecteur vitesse de vent : $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$.

Considérant les couches fluide et solide en parallèles, il vient les paramètres équivalents suivant :

$$(\rho c_p)_{sf} = (1 - \zeta) (\rho c_p)_s + \zeta (\rho c_p)_f \quad (3.14)$$

$$\lambda_{sf} = (1 - \zeta) \lambda_s + \zeta \lambda_f \quad (3.15)$$

$$P_{sf} = (1 - \zeta) P_s + \zeta P_f \quad (3.16)$$

L'expression de l'évolution temporelle de la température selon l'axe vertical est ainsi explicitée par l'équation 3.17.

$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_{\varphi_{St}^m} = \underbrace{\frac{\lambda_{sf}}{(\rho c_p)_{sf}} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}}_{\varphi_{Dt}^m} + \underbrace{\frac{(\rho c_p)_f}{(\rho c_p)_{sf}} v_z \frac{\partial T}{\partial z}}_{\varphi_A^m} + \underbrace{P_{sf}}_{\varphi_P^m} \quad (3.17)$$

Remarque : Dans le cas où la vitesse du fluide (v_z) est nulle, l'équation 3.17 correspond à une reformulation de l'équation de la chaleur (eq. 3.2).

— *Évolution des paramètres thermophysiques* —

Les paramètres thermophysiques observés pour un matériau m sont la conductivité thermique (λ_m), la capacité calorifique massique ($c_{p,m}$) et la masse volumique (ρ_m).

Lors de l'évolution de la teneur en eau du milieu, l'évolution de la conductivité thermique peut être estimée selon une approche¹⁶ simplifiée (eq. 3.18), ou bien empirique (eq. 3.19 et 3.20). À noter qu'aucun modèle physique semi-détaillé dynamique n'existe actuellement aux vues de la complexité des transferts au sein des milieux poreux. Ces approches empiriques induisent une conductivité équivalente, qui comprend dès lors les transferts radiatifs (entre autres) au sein du milieu.

$$\lambda_m(\omega) = \lambda_s^{sec} + \omega_m \lambda_e \quad (3.18)$$

$$\lambda_m(\omega) = \max \left\{ 418 e^{-\log_{10} |\psi_m| - 2,7}, 0, 172 \right\} \quad (3.19)$$

$$\lambda_m(\omega) = 10^7 \left[2, 1 \left(\frac{\rho_m}{1000} \right)^{1,2-2\omega_m} e^{-0,7(\omega_m-0,2)^2} + \left(\frac{\rho_m}{1000} \right)^{0,8+2\omega_m} \right] \quad (3.20)$$

13. Selon la formule de TAYLOR : $\partial_z^2 T|_1 + \partial_z^2 T|_2 = 2 \partial_z^2 T|_{1+2} = 2 \partial_z^2 T$

Où les dérivées partielles ne sont plus exprimées sous la notation de LEIBNIZ, mais sous celle d'EULER.

14. Celle-ci est justifiée par une faible vitesse d'air dans le milieu poreux.

15. Où $\langle T \rangle$ correspond à une homogénéisation de la température par prise de moyenne volumique.

16. Cf. table 2.6 du chapitre 2.

Par ailleurs, dans les études portant sur les PCV, la capacité calorifique massique et la masse volumique sont souvent exprimées sous forme de produit ($\rho c_{p,m}$). Celui-ci est corrélé linéairement à la teneur en eau (eq. 3.21).

$$\rho c_{p,m} = \left[1 - \omega_m^{sat}\right] \rho_m c_{p,m} + \omega_m \rho_e c_{p,e} \quad (3.21)$$

Sur la base de ces paramètres, la diffusivité thermique d'un matériau m peut être obtenue : $D_{m,t} = \lambda_m / (\rho_m c_{p,m})$, notée également $D_{m,t} = \lambda_m / (\rho c_p)_m$.

3.2.3 Conditions aux limites

3.2.3.1 Convection

3.2.3.1.1 Présentation

Les transferts convectifs ont lieu à l'interface de deux milieux de densité différente, typiquement entre un fluide et une surface solide. Ce mode de transfert est donc localisé sur les faces internes et externes de la paroi, et plus généralement de l'enveloppe d'un bâtiment. Considérant l'influence du vent, à l'extérieur la convection est généralement considérée de type forcé (source du mouvement : quantité de mouvement externe \equiv vent). Dans le cas le plus simple (pas de transfert aéraulique), à l'intérieur du bâtiment la convection est de type naturel (source du mouvement : gradient de température).

3.2.3.1.2 Formalisme

Dans une approche nodale, les relations de type physiques semi-détaillées traduisant ces phénomènes sont basées sur l'équation de NEWTON (eq. F.1) qui dérive de la température, *i.e.* du gradient entre le fluide (T_f) et la surface considérée (T_s).

$$\varphi_{cv} = h_{cv}^t (T_f - T_s) \quad (3.22)$$

En fonction du milieu et du type de convection l'expression de h_{cv}^t évolue. Les modèles physiques associés sont explicités dans l'annexe F.

3.2.3.2 Rayonnement

3.2.3.2.1 Présentation

En physique du bâtiment, le transfert radiatif est caractérisé par un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise sur la plage $[0,3; 100] \mu\text{m}$. Plus spécifiquement, selon la loi de PLANK cette irradiation provient de la température de surface des corps. La loi de WIEN permet alors de déterminer les longueurs d'onde d'émission principale (λ_{max} Cf. section 4.2.4.2, chapitre III). Aux vues des températures de surface, il ressort trois types de corps :

1. Le soleil, avec une température de surface estimée à 2900 K et $\lambda_{max} = 1 \mu\text{m}$;
2. La voûte céleste (hors atmosphère), avec une température de surface estimée à 50 K et une longueur d'onde principale de $58 \mu\text{m}$;
3. L'environnement, avec une température estimée à 298 K et $\lambda_{max} = 9,7 \mu\text{m}$;

Considérant la loi de STEFAN-BOLTZMAN (caractérisant l'émittance) et la perception humaine (visibilité du rayonnement par l'œil humain), ces corps peuvent être classés selon deux catégories :

1. Les Courtes Longueurs d'Ondes (CLO), issues du soleil et définissant le spectre allant du proche ultraviolet au proche infrarouge en passant par le visible, soit $[0,3; 5] \mu\text{m}$;
2. Les Grandes Longueurs d'Ondes (GLO), issues de la voûte céleste¹⁷ et de l'environnement, définissant le spectre allant de l'infrarouge moyen à l'infrarouge lointain, soit $[5; 100] \mu\text{m}$.

17. *Nota* : sur terre la température de voûte céleste est à pondérer en fonction de la nébulosité, donc des conditions météorologiques.

Le flux radiatif est donc la somme des flux CLO et GLO : $\varphi_{rd} = \varphi_{CLO} + \varphi_{GLO}$ (3.23)

Les sollicitations CLO sur le plan horizontal, pour le lieu considéré, sont issues des données météorologiques. Les sollicitations GLO quant à elles sont modélisées *via* la loi de STEFAN-BOLTZMANN. Les modèles physiques associés sont explicités dans l'annexe F.

3.2.3.2.2 Formalisme des couches semi-transparentes

— Modèle simplifié —

La modélisation simplifiée des transferts radiatifs considère que le milieu semi-transparent est exempt de réflexion multiple en son sein. Les flux radiatifs nets observés sur les faces supérieures ($\varphi_{Rd}^{net}|_{fs}$ eq. 3.24) et sur la surface protégée ($\varphi_{Rd}^{net}|_{sp}$ eq. 3.25) sont fonction des transmittivités CLO (τ_p^{clo}) et GLO (τ_p^{glo}) du milieu, paramètres clefs du transfert.

D'un point de vue conceptuel, les plans composant le ciel, la surface de la paroi protégée et la protection sont considérés parallèles et de surface infinie, ainsi les facteurs de formes associés aux échanges GLO sont postulés égaux à l'unité. De plus, la voûte céleste est considérée comme un corps noir ($\varepsilon_{vc} = 1$).

$$\varphi_{Rd}^{net}|_{fs} = \begin{cases} \sigma_c \left[\varphi_{CLO} \cdot (1 + \varrho_s) (1 - \varrho_p) \cdot (1 - \tau_p^{clo}) \right. \\ \left. + \left[\sigma T_{vc}^4 + \sigma \varepsilon_s T_s^4 - 2\sigma \varepsilon_p T_p^4 \right] \cdot (1 - \tau_p^{glo}) \right] \end{cases} \quad (3.24)$$

$$\varphi_{Rd}^{net}|_{sp} = \begin{cases} \sigma_c \left[\varphi_{CLO} \tau_p^{clo} (1 - \varrho_s) + \sigma \left(\tau_p^{glo} T_{vc}^4 + \varepsilon_p T_p^4 - (1 + \tau_p^{glo}) \varepsilon_s T_s^4 \right) \right] \\ + (1 - \sigma_c) \left[\varphi_{CLO} (1 - \varrho_s) + \sigma (T_{vc}^4 - \varepsilon_s T_s^4) \right] \end{cases} \quad (3.25)$$

Avec : $\tau_p^{clo} = e^{-k_{clo} \cdot LAI}$ et $\tau_p^{glo} = e^{-k_{glo} \cdot LAI}$.

Où σ_c est le taux de couverture de la protection, ϱ la réflectivité et $\{T_{vc}, T_p, T_s\}$ les températures de voûte céleste, de protection et de surface protégée.

Nota : cette formule adaptée par nos soins, provient de la combinaison de divers modèles présents dans la littérature.

— Modèle multi-réflexif —

Due à l'intrication air-végétation, la prédiction de la répartition du flux irradié dans la canopée est délicate. Afin de faciliter celle-ci, la canopée peut-être définie comme une couche matérielle subdivisible en n sous-couches homogènes. D'un point de vue radiatif, celles-ci sont considérées comme des milieux semi-transparentes dont la superposition induit des réflexions multiples [HE et JIM, 2010]. Les couches de canopée sont alors définies par trois paramètres radiatifs : la transmittance (τ), l'absorptance (α) et la réflectance (ϱ) ; elles sont issues de leurs propriétés structurelles et des propriétés radiatives des feuilles les composant. À noter que la présence d'interréflexions rend la modélisation de la répartition particulièrement complexe ; celles-ci ne sont pas négligeables.

Afin d'obtenir la répartition du flux, un bilan radiatif est effectué par tracé de rayon monodimensionnel. Cette approche, couramment utilisée dans ce type de situation possède une précision suffisante à nos besoins, mais au prix d'un temps de calcul plus long que pour la résolution d'un modèle¹⁸ basé sur l'équation de BEER-LAMBERT.

18. Idéalement, un modèle de type BEER-LAMBERT pourra être obtenu de la simplification du tracé du rayon.

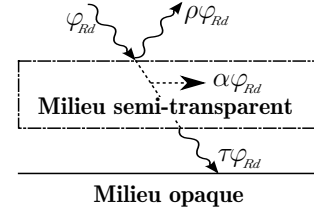


Figure 3.3 – Modèle simplifié

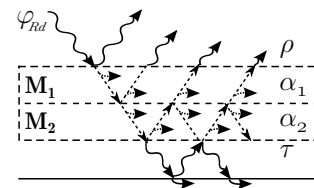


Figure 3.4 – Modèle multi-réflexif pour des milieux M_1 et M_2 semi-transparentes

Le principe consiste à « suivre » l'irradiation¹⁹ au cours de ses réflexions et absorptions au contact des « couches de canopée ». À chaque contact du rayon avec une couche, la répartition des quantités de flux absorbées, réfléchies et transmises sont comptabilisées selon le formalisme des transferts CLO et GLO présenté²⁰ précédemment. Le suivi est interrompu lorsque le critère de convergence est atteint (erreur entre le flux initial et la somme des flux absorbés et perdus). L'algorithme de résolution est présenté par la figure 3.5. À noter que ces travaux sont basés sur ceux de BIGOT [2011].

Enfin, dans une approche semi-détaillée²¹, les transferts radiatifs de type CLO et GLO sont dissociés. La différence réside dans le calcul des paramètres radiatifs associés, ainsi que dans l'initialisation du système : le rayonnement CLO est émis uniquement par le soleil, alors que le rayonnement GLO est émis par toute surface en présence au sein des couches la canopée et à leurs interfaces.

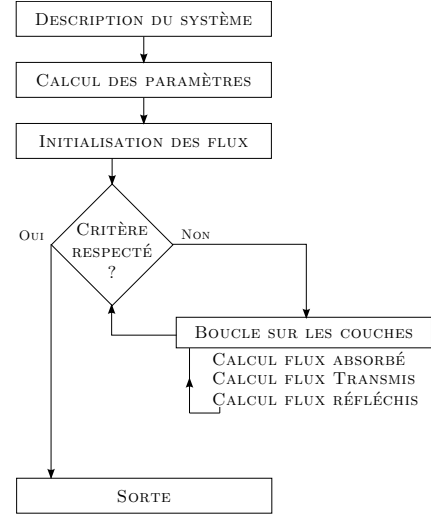


Figure 3.5 – Algorithme de résolution associé au modèle de tracé de rayon

— Les paramètres radiatifs dans la canopée —

Les paramètres nécessaires à la caractérisation radiative de la canopée sont la transmittance (τ), l'absorptance (α) et la réflectance (ϱ). Il est possible de définir la transmittance par la loi de BEER-LAMBERT (eq. 3.26). L'absorptance locale suit cette même loi, elle peut d'ailleurs être exprimée en fonction de la transmittance (eq. 3.29). Toutefois, le paramètre souhaité est l'absorptance de la canopée, donc l'absorptance cumulée. Celle-ci est alors obtenue²² par intégration de l'absorptance locale sur l'épaisseur considérée (eq. 3.27). Enfin, la réflectance est définie par complémentation à l'unité (eq. 3.28).

$$\tau = T e^{-tz} \quad (3.26) \quad \alpha = \frac{AT}{-t} [e^{-tz} - 1] \quad (3.27) \quad \varrho = 1 - \tau - \alpha \quad (3.28)$$

Où

$$\alpha_l = A_l e^{-az} = AT e^{-tz} \quad (3.29) \quad -tz = b + a \frac{C_a (1 - 0,47\gamma) \beta \text{LAD}(z)}{(1 - 1/2K)\gamma - 1} \quad (3.31)$$

$$\alpha = \int_{\Delta z} \alpha_l dz = \frac{AT}{-t} [e^{-tz}]_0^z \quad (3.30) \quad C_a = 0,283 + 0,785 \alpha_f - 0,159 \alpha_f^2 \quad (3.32)$$

$$k = \frac{\sqrt{x^2 + 1/\tan^2 \theta}}{1,47 + 0,45x + 0,1223x^2 - 0,013x^3 + 0,000509x^4} \quad (3.33)$$

Suivant cette approche, NORMAN [1976] propose une formulation empirique de t , donc de τ (dans laquelle $T = 1$). Initialement définie pour une canopée entière, celle-ci est amendée afin d'être valide pour une approche discrète (eq. 3.31) ; où α_f est l'absorptivité de la feuille et γ le rapport des rayonnements direct et global sur le spectre visible. Le LAI est alors remplacé par le LAD²³ et l'équation est pondérée par des paramètres constants $\{a, b\}$. Un paramètre évolutif est également ajouté (β), il permet de considérer l'hétérogénéité structurelle de la canopée (fonction horaire). Considérant la complexité de la description géométrique de la canopée, donc de

19. considérée comme un unique rayon se déplaçant perpendiculairement à la paroi

20. Le lecteur souhaitant plus de détail est prié de se référer à [BIGOT, 2011], page 74.

21. Une approche chromatique est envisageable avec l'algorithme mis en œuvre, mais elle correspondrait à une approche détaillée.

22. Cette grandeur a été mise en équation par nos soins afin de répondre aux besoins : l'acquisition de l'absorptivité dans une couche de canopée d'épaisseur z .

23. Pour rappel : $\text{LAD} = \text{LAI} \frac{e(z)}{h}$, où h est la hauteur de la canopée et $e(z)$ l'épaisseur considérée.

D'autres phénomènes considérés sont présents aux interfaces des couches matérielles, il s'agit des apports externes ($\dot{A}_{H_2O}^{ex}$), de l'interception (\dot{I}_{H_2O}), de la condensation ($\dot{C}d_{H_2O}^d$), du stockage en surface ($\dot{S}_{H_2O}^d$) ainsi que des pertes par ruissellement (\dot{R}_{H_2O}) et percolation (\dot{P}_{H_2O}).

À noter que les transferts hydriques issus des transferts thermiques et hygriques sont traités dans la section 3.5 définissant les couplages inter-champs. Il s'agit ici de l'absorption par les racines ($\dot{Q}_{H_2O}^m$), de la condensation ($\dot{C}d_{H_2O}^m$ et $\dot{C}d_{H_2O}^d$) et de l'évaporation ($\dot{E}_{H_2O}^m$).

— Les transferts hygriques —

Parmi les transferts hygriques considérés dans les milieux solides se trouvent la diffusion (Q_D^m), le stockage (Q_{St}^m), l'évaporation (Q_{Ev}^m) et la condensation (Q_{Cd}^m). Par ailleurs, dans les milieux fluides se trouve la diffusion (Q_D^f) et l'advection (Q_{Ad}^f), alors qu'aux interfaces des milieux fluides et solides se trouvent l'infiltration (Q_I^m), la condensation (Q_{Cd}^d), l'évaporation (Q_{Ev}^d) et la convection (Q_{Cv}^d). Enfin, qu'elle soit dans la couche matérielle (mousses, etc.) ou en surface, la végétation possède un transfert spécifique : la transpiration (Q_{Tr}^f et Q_{Tr}^m).

Nota : Dans nos cas d'études le seul transfert aéraulique considéré dans une couche matérielle concerne le substrat de l'ISOTEST 1, cependant celle-ci est supposée sans transfert hygrique. Ainsi, le transfert hygrique par convection aéraulique n'est pas abordé.

3.3.2 Les transferts hydriques

3.3.2.1 L'équation de transfert

— Couplage des transferts hydriques —

Obtenu à partir du bilan massique, le couplage des phénomènes de transferts hydriques au sein d'une couche est proposé par l'équation 3.34, qui est scindée en deux parties, la première représente les transferts en surface et la seconde les transferts dans le milieu. Le couplage étant opéré par le biais de l'infiltration ($\dot{I}_{H_2O}^m$). Son utilisation nécessite, si besoin, une simplification des termes non nécessaires pour la couche étudiée.

$$\begin{aligned} \dot{A}_{H_2O}^{ex} + \dot{C}d_{H_2O}^d &= \dot{I}_{H_2O} + \dot{S}_{H_2O}^d + \dot{E}_{H_2O}^d + \dot{R}_{H_2O} + \dot{I}_{H_2O}^m \\ \dot{I}_{H_2O}^m + \dot{A}_{H_2O}^m + \dot{C}d_{H_2O}^m &= \dot{S}_{H_2O}^m + \dot{D}_{H_2O}^m + \dot{C}_{H_2O}^m + \dot{Q}_{H_2O}^m + \dot{E}_{H_2O}^m + \dot{P}_{H_2O} \end{aligned} \quad (3.34)$$

— Approche —

La diffusion capillaire ($\dot{D}_{H_2O}^m$) est localisée au sein d'une couche solide, elle apparaît pour des pores ayant un diamètre supérieur à $0,1 \mu m$. Elle est donc présente dans le substrat et potentiellement dans la structure. Lors de la modélisation de ce phénomène on distingue généralement deux approches, celles-ci sont caractérisées par la variable observée :

1. La pression capillaire²⁵ de l'eau dans le milieu (h_m) ;
2. La fraction volumique d'eau dans le milieu (ω_m).

Leurs domaines de validités sont différents. En effet, l'approche basée sur la pression capillaire est valide dans les milieux saturés ou non saturés, alors que l'approche basée sur la fraction volumique n'est pas valable pour un substrat tendant vers la saturation²⁶. Par contre, pour des milieux insaturés l'approche basée sur la fraction volumique est avantageuse, car en ordre de grandeur, l'évolution de ω_m étant plus faible que celle de h_m , elle réduit l'impact des erreurs numériques [SKAGGS et KHALEEL, 1982]. Dans notre étude, le risque de saturation pour le substrat avoisinant zéro (terreau et scories), l'approche basée sur la fraction volumique est utilisée.

— Formalisme —

25. Où $h = \psi_m + z$, avec z la hauteur de la colonne d'eau.

26. Car dans ce cas $\partial\omega_m \rightarrow 0$ et donc $D_l(\omega_m) \rightarrow \infty$, car $D_l(\omega_m) = \frac{\partial\psi_m}{\partial\omega_m}$, où $D_l(\omega_m)$ est la diffusivité hydrique.

En supposant le transfert monodimensionnel selon l'axe Oz , et considérant la conduction gravitaire, la formulation du problème permet d'obtenir l'équation 3.35, dite de RICHARDS unidimensionnelle exprimée selon l'axe z . Elle est obtenue *via* un bilan de flux hydrique effectué sur une maille virtuelle dans le milieu, ne considérant que le stockage et la conduction capillaire. Avec $V_{H_2O,m}^{sat}$ le volume d'eau contenu par le milieu m à saturation, S_u la surface unitaire (1 m^2) et S_r les termes sources (évaporation, condensation, *etc.*). La diffusivité et la conductivité hydrique ($D_{m,l}$ et $K_{m,l}$) associées au milieu m sont définies par les relations de BROOKS et COREY, où b est une constante caractéristique du milieu.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega_m(z,t)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{m,l}(\omega_m) \frac{\partial \omega_m(z,t)}{\partial z} + K_{m,l}(\omega_m) \right] + S_r \\ &\Downarrow \\ \frac{S_u}{V_{H_2O,m}^{sat}} \dot{S}_{H_2O}^m &= \frac{S_u}{V_{H_2O,m}^{sat}} \left[\dot{D}_{H_2O}^m + \dot{C}_{H_2O}^m \right] + S_r \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$D_{m,l}(\omega_m) = \frac{-b K_{m,l}^{sat} \psi_{m,l}^{sat}}{\omega_m^{sat}} \cdot \left[\frac{\omega_m(z,t)}{\omega_m^{sat}} \right]^{b+2} \quad K_{m,l}(\omega_m) = K_{m,l}^{sat} \left(\frac{\omega_m}{\omega_m^{sat}} \right)^{2b+3}$$

Compte tenu des dérivées partielles du premier ordre en temps et du deuxième ordre en espace, cette équation nécessite une condition aux limites temporelle et deux conditions aux limites spatiales. Elles sont énoncées ci-dessous, où $K_{i,l}$ est la conductivité hydrique capillaire de la couche i et où $\{\dot{\varrho}_{H_2O}^i, \dot{\varrho}_{H_2O}^l, \dot{\varrho}_{H_2O}^e\}$ correspondent respectivement aux flux de conduction capillaire aux interfaces interne, liaison et externe.

Couche 1	Couche 2
CI ₁ : $\omega_1(z, 0) = \omega_1^0$ (3.36)	CI ₂ : $\omega_2(z, 0) = \omega_2^0$ (3.39)
CL _i : $-K_{1,l} \cdot \frac{\partial \omega_1(0,t)}{\partial z} = \dot{\varrho}_{H_2O}^{i,t}$ (3.37)	CL _{li} : $-K_{2,l} \cdot \frac{\partial \omega_2(z_1,t)}{\partial z} = \dot{\varrho}_{H_2O}^{l,t}$ (3.40)
CL _{li} : $-K_{1,l} \cdot \frac{\partial \omega_1(z_1,t)}{\partial z} = \dot{\varrho}_{H_2O}^{l,t}$ (3.38)	CL _e : $-K_{2,l} \cdot \frac{\partial \omega_2(z_2,t)}{\partial z} = \dot{\varrho}_{H_2O}^{e,t}$ (3.41)

Avec $\dot{\varrho}_{H_2O}^e = \dot{A}_{H_2O}^{ex} + \dot{C}_{H_2O}^d - \dot{I}_{H_2O} - \dot{S}_{H_2O}^d - \dot{E}_{H_2O}^d - \dot{R}_{H_2O}$, pour la liaison : $\dot{\varrho}_{H_2O}^l = \dot{I}_{H_2O}^m$ et pour la face interne : $\dot{\varrho}_{H_2O}^e = \dot{C}_{H_2O}^d - \dot{E}_{H_2O}^d - \dot{P}_{H_2O}$

À l'instar de la diffusion thermique, nous pouvons alors distinguer trois types de nœud : les nœuds de surface, les nœuds internes et les nœuds de liaisons entre les couches. La température des nœuds de surface est régie par les relations décrivant les conditions aux limites sur les faces extérieure et intérieure de la paroi. Elles sont dès lors conditionnées par les sollicitations issues de l'ambiance intérieure et de l'environnement extérieur. Les températures des nœuds internes, quant à elles, sont issues de la discrétisation spatiotemporelle de l'équation 3.35. Enfin, la fraction volumique du nœud de liaison peut être donnée par deux approches : statique (eq. 3.42) ou dynamique (eq. 3.43), respectivement nommées conditions aux limites de type NEUMAN liaison statique (Nls) et NEUMAN liaison dynamique (Nld). À noter que la discontinuité associée à la grandeur observée (la fraction volumique) est traitée par le biais de l'équation 3.44.

$$K_{1,l} \frac{\partial \omega(z_1,t)}{\partial z} \Big|_1 = K_{2,l} \frac{\partial \omega^*(z_1,t)}{\partial z} \Big|_2 \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial \omega(z_1,t)}{\partial t} \Big|_1 + \frac{\partial \omega^*(z_1,t)}{\partial t} \Big|_2 = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{1,l}(\omega) \frac{\partial \omega(z_1,t)}{\partial z} \right] \Big|_1 + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{2,l}(\omega^*) \frac{\partial \omega^*(z_1,t)}{\partial z} \right] \Big|_2 \quad (3.43)$$

$$\omega^*(z_1,t) \Big|_2 = \omega(z_1,t) \Big|_1 [V_{H_2O,1}^{sat}/V_{H_2O,2}^{sat}] \quad (3.44)$$

Spécifiquement développée pour PcvBât, l'approche dynamique est basée sur un bilan hydrique suivant l'approche développée pour le transfert thermique (eq. 3.10). Conservant l'homogénéité

de l'ordre spatial dans le système, cette approche est donc utilisée.

— Cas d'une surface inclinée —

Dans le cas d'une surface inclinée²⁷ d'un angle α par rapport au plan horizontal, PHILIP [1991] propose l'équation 3.45, qui est exprimée dans le référentiel du plan incliné²⁸ x^*0z^* (eq. 3.45).

$$\dot{C}_{H_2O}^m = \frac{V_{H_2O,m}^{sat}}{S_u} \frac{dK_{m,l}(\omega_m)}{d\omega} \frac{\partial \omega_m}{\partial z^*} \cos \alpha \quad (3.45)$$

— Cas d'une résistance de contact —

Le débit d'eau liquide infiltrée dans le milieu matériel ($\dot{I}_{H_2O}^m$) en $z = z_1$, à l'interface des milieux 1 et 2, conditionne la teneur en eau en son sein ainsi que l'eau ruisselée à l'interface (\dot{R}_{H_2O}). Ce débit est principalement conditionné par la capacité du milieu à contenir de l'eau liquide. Cependant, l'état de surface joue également un rôle important. Cette caractéristique est définie par le paramètre sans unité $\epsilon_{m,l} \in [0; 1]$. À noter que ce paramètre permet également de considérer la présence d'un film ou un revêtement assurant l'étanchéité (dans ce cas : $\epsilon_{m,l} = 0$).

L'évolution de l'infiltration est basée sur la modélisation du nœud de liaison (eq. 3.43) à laquelle est ajouté un facteur caractérisant l'état de surface : $\epsilon_{m,l}$. La nouvelle définition de l'équation régissant la valeur du champ de ω (eq. 3.46) permet de formaliser le débit infiltré (eq. 3.47), dans lequel S_u est la surface unitaire ($1 m^2$).

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \omega(z_1, t)}{\partial t} \right|_1 + \left. \frac{\partial \omega^*(z_1, t)}{\partial t} \right|_2 &= \frac{\partial}{\partial z} \left[\epsilon_{1,l}(\omega) D_{1,l}(\omega) \frac{\partial \omega(z_1, t)}{\partial z} \right] \Big|_1 \\ &+ \frac{d[\epsilon_{1,l}(\omega) K_{1,l}(\omega)]}{d\omega} \frac{\partial \omega}{\partial z^*} \cos \alpha \Big|_1 + \frac{\partial}{\partial z} \left[\epsilon_{2,l}(\omega^*) D_{2,l}(\omega^*) \frac{\partial \omega^*(z_1, t)}{\partial z} \right] \Big|_2 \\ &+ \frac{d[\epsilon_{2,l}(\omega^*) K_{2,l}(\omega^*)]}{d\omega} \frac{\partial \omega^*}{\partial z^*} \cos \alpha \Big|_2 \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{H_2O}^m(t) &= \frac{V_{H_2O}^{sat}}{S_u} \frac{\partial}{\partial z} \left[\epsilon_{1,l}(\omega) D_{1,l}(\omega) \frac{\partial \omega(z_1, t)}{\partial z} \right] \Big|_1 + \frac{d[\epsilon_{1,l}(\omega) K_{1,l}(\omega)]}{d\omega} \frac{\partial \omega}{\partial z^*} \cos \alpha \Big|_1 \\ &+ \frac{V_{H_2O}^{sat}}{S_u} \frac{\partial}{\partial z} \left[\epsilon_{2,l}(\omega^*) D_{2,l}(\omega^*) \frac{\partial \omega^*(z_1, t)}{\partial z} \right] \Big|_2 + \frac{d[\epsilon_{2,l}(\omega^*) K_{2,l}(\omega^*)]}{d\omega} \frac{\partial \omega^*}{\partial z^*} \cos \alpha \Big|_2 \end{aligned} \quad (3.47)$$

Nota : cette approche est également utilisable aux limites de la paroi (faces interne et externe), notamment pour considérer l'effet de la modification de l'état de surface dû aux conditions météorologiques (ex : conductivité hydrique de la terre évoluant en fonction de l'irradiation solaire, etc.).

3.3.2.2 Les apports

Les apports hydriques ont la particularité d'apparaître sous forme d'épisodes, induisant une discontinuité temporelle. Ils peuvent être dispensés au sein des couches matérielles ($\dot{A}_{H_2O}^m$) ou à leurs surfaces, alors nommés apports externes ($\dot{A}_{H_2O}^{ex}$). Les apports externes sont composés de l'irrigation aérienne ($\dot{A}_{H_2O}^{ia}$) et des précipitations ($\dot{A}_{H_2O}^p$), tel que $\dot{A}_{H_2O}^{ex} = \dot{A}_{H_2O}^{ia} + \dot{A}_{H_2O}^p$.

3.3.2.2.1 L'irrigation interne

L'irrigation au sein du milieu, ou irrigation interne, est classiquement dispensée par un automate prenant en entrée l'heure et la durée choisie. De ce fait, le modèle utilisé (eq. 3.48) est

27. À noter que cette inclinaison n'impacte pas la diffusion capillaire.

28. Rotation de l'axe y d'un angle α dans le sens horaire, définissant le référentiel x^*0z^* à partir de $x0z$.

alors caractérisé par le débit sélectionné (D_{im} en $[m.s^{-1}]$) ainsi que par une fonction créneau sans unité qui définit la planification des périodes d'arrosage et l'évolution de l'intensité : $f(t) \in [0; 1]$.

$$\dot{A}_{H_2O}^m = D_{im} f(t) \quad (3.48)$$

3.3.2.2.2 L'irrigation aérienne

À l'instar de l'irrigation interne, l'irrigation aérienne est contrôlée. Elle est définie par un modèle similaire (eq. 3.49) caractérisé par le débit sélectionné (D_{ia}) ainsi que par une fonction créneau définissant la planification des périodes d'arrosage ($g(t)$).

$$\dot{A}_{H_2O}^{ia} = D_{ia} g(t) \quad (3.49)$$

3.3.2.2.3 Les précipitations

Non contrôlée par l'homme, les débits volumiques précipités ($\dot{A}_{H_2O}^p$) sont difficiles à modéliser, car nécessitant la prédiction des conditions météorologiques locales. Pour faire face à cet écueil, les données expérimentales acquises sur le site concerné sont utilisées. Dans le cas où celles-ci ne seraient pas accessibles, les données de la station météorologique la plus proche peuvent éventuellement être utilisées. Enfin, issues de la compilation des mesures du site observé durant les années antérieures (fichiers *.tmy*), les précipitations « types » sont également envisageables pour une simulation exploitant les résultats à l'échelle du mois.

3.3.2.3 Les termes sources

Mis à part l'évaporation et les pertes racinaires, les termes sources sont des gains. Il s'agit de l'interception, du stockage libre et du stockage lié.

3.3.2.3.1 L'interception

Le flux hydrique intercepté²⁹ représente l'eau liquide restante en surface des milieux (ne permettant que peu ou pas d'infiltration) au cours de son transfert gravitaire. Dans notre étude il s'agit généralement de l'eau présente en surface des feuilles de la canopée ou de la tôle. La stabilité du fluide est alors due aux forces de contact avec la surface.

Considérant l'approche du modèle souhaité et la complexité structurelle de la canopée, une modélisation simplifiée de ce phénomène est utilisée. Elle est proposée par l'équation 3.50, pour laquelle la constante κ est un coefficient sans unité sur $[0; 1]$ caractérisant la capacité du milieu à intercepter l'eau liquide, dans le cas de la canopée celui-ci est fonction du LAI et du taux de couverture : $\kappa = f(LAI, T_x^c)$. Enfin, It (It^{max}) représente le volume d'eau (maximal) intercepté par la surface.

$$\dot{It}_{H_2O} = \kappa \left[1 - \frac{It}{It^{max}} \right] A_{H_2O}^{ex} \quad (3.50)$$

3.3.2.3.2 Stockage libre

L'eau liquide stockée sous forme libre ($S_{H_2O}^d$) est potentiellement présente en surface des milieux continus permettant peu ou pas d'infiltration. La stabilité du fluide est alors due à la force gravitaire (*i.e.* eau dans une dépression de surface).

L'évolution du stockage libre est défini par un modèle simplifié (eq. 3.51) pour lequel la constante $S_{H_2O}^{d,max}$ correspond au volume d'eau liquide maximal³⁰ stocké en surface et $\Pi_0^{S_{H_2O}^{d,max}}$ correspond à la fonction porte dont les bornes sont définies en 0 et $S_{H_2O}^{d,max}$.

$$\dot{S}_{H_2O}^d = \frac{S_{H_2O}^{d,max}}{S_u} \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[S_{H_2O}^d \Pi_0^{S_{H_2O}^{d,max}} \right] \quad (3.51)$$

29. Ce phénomène négligeable lors de forts épisodes pluviométriques, mais importants lors de faibles apports.

30. Car l'eau présente n'étant pas nécessairement stockée, elle peut ruisseler, *etc.*

3.3.2.3.3 Stockage lié

Sous forme liée ($S_{H_2O}^m$), l'eau est présente dans un milieu matériel. Le stockage est dans ce cas principalement permis par les forces capillaires et de sorption.

À l'instar des transferts thermiques, le flux stocké lié ($\dot{S}_{H_2O}^m$) est considéré lors de la définition de la conduction hydrique à l'échelle de la couche (eq. 3.35), et lors des couplages à l'échelle de la paroi (eq. 3.34).

3.3.2.4 Les pertes

3.3.2.4.1 La percolation

Située en face interne (basse) de la couche matérielle, la percolation (\dot{P}_{H_2O}) apparaît principalement lorsque l'eau liquide transportée par conduction gravitaire atteint la surface inférieure du milieu. Le débit associé dérive de la teneur en eau, *i.e.* du gradient entre le milieu et l'exutoire (en général $\omega_{ex} = 0$). Il est pondéré par une conductivité hydrique cinématique à la percolation (C_{per}^m en $[m.s^{-1}]$) qui conditionne le transfert, matérialisant la capacité du système à évacuer l'eau liquide percolée.

$$\dot{P}_{H_2O} = \frac{V_{H_2O,m}^{sat}}{S_u} C_{per}^m \left. \frac{\partial \omega_p}{\partial x} \right|_{ex} \quad (3.52)$$

$$\dot{P}_{H_2O} = \frac{V_{H_2O,m}^{sat}}{S_u \Delta x} C_{per}^m [\omega_{ex}^p - \omega_p] \quad (3.53)$$

Dans une approche nodale (plus cohérente avec la précision recherchée), le percolat est explicité par l'équation 3.53, où Δx correspond à la distance entre le nœud observé à ω_p et l'exutoire à ω_{ex}^p .

3.3.2.4.2 Le ruissellement

Contrairement à la percolation, les pertes par ruissellement (\dot{R}_{H_2O}) sont situées en face supérieure de la couche matérielle. Dans une approche simplifiée, l'évolution peut être déduite des flux en présence par un bilan hydrique (eq. 3.54). Dans une approche semi-détaillée, et selon les principes présentés pour la percolation, le ruissellement dérive de la teneur en eau. La conductance hydrique associée conditionne le transfert (C_{rui} en $[m.s^{-1}]$) (eq. 3.55). Les flux associés sont représentés sur la figure 3.6.

$$\dot{R}_{H_2O} = \dot{A}_{H_2O}^{ex} - [\dot{I}_{H_2O} + \dot{S}_{H_2O}^d + \dot{I}_{H_2O}] \quad (3.54)$$

$$\dot{R}_{H_2O} = \frac{V_{H_2O,m}^{sat}}{S_u} C_{rui}^m \left. \frac{\partial \omega_p}{\partial x} \right|_{ex} \quad (3.55)$$

$$\dot{R}_{H_2O} = \frac{V_{H_2O,m}^{sat}}{S_u \Delta x} C_{rui}^m [\omega_{ex}^r - \omega_p] \quad (3.56)$$

À l'instar du percolat, le ruissellement est explicité sous forme nodale par l'équation 3.56, où Δx correspond à la distance entre le nœud observé à ω_p et l'exutoire à ω_{ex}^r .

Nota : les exutoires pour l'eau percolée (ω_{ex}^p) et ruisselée (ω_{ex}^r) ne sont pas nécessairement les mêmes, leurs valeurs sont donc susceptibles d'être indépendantes.

3.3.3 Les transferts hygriques

3.3.3.1 L'équation de transfert

— Couplage des transferts hygriques —

Obtenu à partir du bilan massique, le couplage des phénomènes de transferts hydriques au sein

d'une couche est proposé par l'équation 3.34. Son utilisation nécessite, si besoin, une simplification des termes non nécessaires pour la couche étudiée.

$$Q_{St}^f = Q_{Tr}^f + Q_{Ev}^d + Q_{Ad}^f + Q_D^f + Q_{Cv}^d - Q_{Cd}^d \quad (3.57)$$

— Formalisme —

En supposant le transfert monodimensionnel selon l'axe Oz , la formulation du problème diffusif est définie par l'équation 3.58. Avec m_{air}^{sec} la masse d'air sèche d' 1 m^3 à la température du milieu et S_u la surface unitaire (1 m^2), et où $D_{m,g}$ est la diffusivité hygrique associée au milieu m (eq. 3.59, [PALOMO DEL BARRIO, 1998]). Elle est obtenue *via* un bilan de flux hygrique effectué sur une maille virtuelle dans le milieu, ne considérant que le stockage et la conduction. Elle permet par ailleurs d'obtenir le flux stocké Q_{St} .

$$\frac{m_{air}^{sec}}{S_u} \frac{\partial W_m(z,t)}{\partial t} = \frac{m_{air}^{sec}}{S_u} \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{m,g}(W_m) \frac{\partial W_m(z,t)}{\partial z} \right] \Leftrightarrow Q_{St}^m = Q_D^m \quad (3.58)$$

Avec :

$$D_{m,g}(W_m) = 10^2 \left[1 - \frac{\rho_m}{\rho_m^*} \right] \frac{\xi D_{H_2O}^g L_v}{(R_v)^2 T_m^3} \frac{P_a P_{v,m}}{P_a - P_{v,m}} \quad (3.59)$$

$$P_{v,m} = P_{v,m}^{sat} \exp \left[\frac{g \psi_m}{R_v T_m} \right] \quad (3.60)$$

Où $P_{v,m}^{sat}$ est la pression de vapeur d'eau à saturation, R_v est la constante de gaz associée à la vapeur d'eau, ψ_m le potentiel hydrique total à équilibre avec la vapeur, $D_{H_2O}^g$ est la diffusion de la vapeur d'eau dans l'air libre, ρ_m^* est la masse volumique spécifique³¹ et ξ un paramètre constant.

Compte tenu des dérivées partielles du premier ordre en temps et du deuxième ordre en espace, cette équation nécessite une condition aux limites temporelle et deux conditions aux limites spatiales. Elles sont énoncées ci-dessous, où $K_{i,g}$ est la conductivité hygrique de la couche i et où $\{\zeta_{H_2O}^i, \zeta_{H_2O}^l, \zeta_{H_2O}^e\}$ correspondent respectivement aux flux de conduction hygriques aux interfaces interne, de liaison et externe.

Couche 1	Couche 2
CI ₁ : $W_1(z, 0) = W_1^0$ (3.61)	CI ₂ : $W_2(z, 0) = W_2^0$ (3.64)
CL _i : $-K_{1,g} \cdot \frac{\partial W_1(0,t)}{\partial z} = \zeta_{H_2O}^{i,t}$ (3.62)	CL _{li} : $-K_{2,g} \cdot \frac{\partial W_2(z_1,t)}{\partial z} = \zeta_{H_2O}^{l,t}$ (3.65)
CL _{li} : $-K_{1,g} \cdot \frac{\partial W_1(z_1,t)}{\partial z} = \zeta_{H_2O}^{l,t}$ (3.63)	CL _e : $-K_{2,g} \cdot \frac{\partial W_2(z_2,t)}{\partial z} = \zeta_{H_2O}^{e,t}$ (3.66)

À l'instar de la diffusion thermique, nous pouvons alors distinguer trois types de nœud : les nœuds de surface, les nœuds internes et les nœuds de liaisons entre les couches.

Les températures des nœuds de surface sont régies par les relations décrivant les conditions aux limites sur les faces extérieures et intérieures de la paroi. Elles sont dès lors conditionnées par les sollicitations issues de l'ambiance intérieure et de l'environnement extérieur. Les températures des nœuds internes, quant à elles, sont issues de la discrétisation spatiotemporelle de l'équation (eq. 3.58). Enfin, la fraction volumique du nœud de liaison peut être donnée par deux approches : statique (eq. 3.67) ou dynamique (eq. 3.68), respectivement nommées conditions aux limites de type NEUMAN liaison statique (Nls) et NEUMAN liaison dynamique (Nld). À noter que contrairement à la teneur volumique, le rapport de mélange est continu à l'interface d'une discontinuité spatiale (matérielle).

$$K_{1,g} \frac{\partial W(z_1,t)}{\partial z} \Big|_1 = K_{2,g} \frac{\partial W(z_1,t)}{\partial z} \Big|_2 \quad (3.67)$$

31. Définie comme le produit de la masse volumique et de l'accélération de la gravité.

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial W(z_1, t)}{\partial t} \right|_1 + \left. \frac{\partial W(z_1, t)}{\partial t} \right|_2 &= \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{1,g}(W) \frac{\partial W(z_1, t)}{\partial z} \right] \Big|_1 \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{2,g}(W) \frac{\partial W(z_1, t)}{\partial z} \right] \Big|_2 \end{aligned} \quad (3.68)$$

Spécifiquement développée pour PcvBÂT, l'approche dynamique est basée sur un bilan hygrique suivant l'approche développée pour le transfert thermique (eq. 3.10). Conservant l'homogénéité de l'ordre spatial dans le système, cette approche est donc utilisée.

Enfin, il est à remarquer la possible continuité matérielle entre deux milieux vis-à-vis de l'air, permettant à ce fluide d'évoluer à travers ceux-ci. Cette notion permet alors d'appliquer la relation obtenue pour les nœuds de liaison aux nœuds de surface. Cette approche est traitée dans l'infiltration.

— Cas d'une résistance de contact —

Le débit de vapeur d'eau infiltrée dans le milieu matériel (Q_I^m) conditionne le rapport de mélange en son sein. Ce débit est principalement conditionné par la capacité du milieu à contenir de la vapeur d'eau (*via* la diffusivité). Cependant, l'état de surface ($\epsilon_{m,g}$) joue également un rôle important : celui de la perméabilité ($\epsilon_{m,g} = 0$ si imperméable).

L'évolution de l'infiltration est basée sur la modélisation du nœud de liaison (eq. 3.68) à laquelle est ajouté un facteur caractérisant l'état de surface : $\epsilon_{m,g}$. La nouvelle définition de l'équation régissant la valeur du champ de W (eq. 3.69) permet de formaliser le débit infiltré (eq. 3.70), dans lequel S_u est la surface unitaire (1 m^2).

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial W(z_1, t)}{\partial t} \right|_1 + \left. \frac{\partial W(z_1, t)}{\partial t} \right|_2 &= \frac{\partial}{\partial z} \left[\epsilon_{1,g}(W) D_{1,g}(W) \frac{\partial W(z_1, t)}{\partial z} \right] \Big|_1 \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\epsilon_{2,g}(W) D_{2,g}(W) \frac{\partial W(z_1, t)}{\partial z} \right] \Big|_2 \end{aligned} \quad (3.69)$$

$$\begin{aligned} Q_I(t) &= \frac{m_{air}^{sec}}{S_u} \frac{\partial}{\partial z} \left[\epsilon_{1,g}(W) D_{1,g}(W) \frac{\partial W(z_1, t)}{\partial z} \right] \Big|_1 \\ &+ \frac{m_{air}^{sec}}{S_u} \frac{\partial}{\partial z} \left[\epsilon_{2,g}(W) D_{2,g}(W) \frac{\partial W(z_1, t)}{\partial z} \right] \Big|_2 \end{aligned} \quad (3.70)$$

3.3.3.2 Les apports

3.3.3.2.1 La convection

Les transferts convectifs hygriques (Q_{cv}^d), comme pour leurs homologues thermiques, ont la particularité d'être définis à l'interface de deux milieux de densité différente, typiquement entre un fluide et une surface solide. À l'instar de la convection thermique, la convection hygrique peut être de type libre (source du mouvement : gradient de pression partielle en vapeur d'eau) ou de type forcé (source du mouvement : quantité de mouvement externe).

Les relations de type physiques semi-détaillées traduisant ces phénomènes sont basées sur une équation similaire à l'équation de NEWTON (eq. 3.71) où $P_{v,a}$ et $P_{v,sp}$ représentent les pressions partielles en eau associées à l'air ou en surface de la paroi.

$$Q_{cv}^d(z, t) = h_{cv}^g(z, t) \cdot [P_{v,sp}(z, t) - P_{v,a}(z, t)] \quad (3.71)$$

Valide pour les transferts convectifs forcés et libres, l'adaptation de l'équation aux conditions locales réside dans la valeur du coefficient d'échange utilisé (h_{cv}^g). Considérant que les transports de vapeur d'eau et de chaleur sont convectifs (et non diffusifs), le nombre de LEWIS est proche de l'unité ce qui permet d'estimer la valeur de h_{cv}^g à partir de celle de h_{cv}^t (eq. 3.72) [PALOMO DEL BARRIO, 1998]. Avec ζ la constante psychrométrique thermodynamique et h_v la chaleur latente de vaporisation.

$$h_{cv}^g(z, t) = \frac{h_{cv}^t(z, t)}{\zeta h_v} = \frac{\epsilon_m \rho_{air}}{P_{air} [r_a^t + r_s^t]} \quad (3.72)$$

3.3.3.2.2 *L'advection*

L'advection (Q_{Ad}^f) est un transfert aéraulique caractérisé le déplacement horizontal d'un fluide, ici d'une masse d'air atmosphérique. À l'instar de la convection hygrique, le phénomène l'advection dérive du potentiel de pression partielle en eau (eq. 3.73), *i.e.* du gradient entre le milieu considéré et l'air extérieur. La source du mouvement est par contre exclusivement due à une quantité de mouvement externe (le vent).

La modélisation est donc basée sur une équation similaire à l'équation de convection hygrique (eq. 3.74) où $P_{v,a}$ et $P_{v,sp}$ représentent les pressions partielles en eau associées à l'air extérieur et au milieu considéré. La formulation de Q_{Ad} est obtenue par hypothèse des gaz parfaits (sur la vapeur d'eau).

$$\frac{\partial P_v}{\partial t} = v_x \frac{\partial P_v}{\partial x} \quad (3.73)$$

$$Q_{Ad}^f(z, t) = \underbrace{\frac{\mathcal{N}_{H_2O}}{R \Delta x T(z, t)}}_{h_{ad}^g(z, t)} \cdot \Delta z v_x \cdot [P_{v,a}(z, t) - P_{v,m}(z, t)] \quad (3.74)$$

Où v_x est la composante en x du vecteur vitesse de vent $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$, \mathcal{N}_{H_2O} est la masse molaire de l'eau, Δz la discrétisation spatiale verticale et Δx la distance caractéristique entre les localisations de $P_{v,a}$ et $P_{v,sp}$. À noter que dans la lame d'air, sous la canopée, la vitesse de vent (v_x) peut être déduite de la vitesse au dessus de la canopée (v_0) *via* le modèle le modèle proposé par PERRIER [1976] : $v_x = v_0 e^{-D \text{LAD}(z)}$, où D est un paramètre constant.

3.3.3.3 Les termes sources

3.3.3.3.1 *La transpiration*

— *Présentation* —

La transpiration est un phénomène spécifique, car pouvant être mis en œuvre uniquement par un être vivant. Dans notre étude il s'agit de la végétation. Le débit de vapeur d'eau transpiré (Q_{Tr}) permet à la plante de contrôler sa température interne afin qu'elles correspondent au mieux aux besoins de son métabolisme.

Diverses stratégies ont été adoptées par la végétation vis-à-vis de la transpiration, elles sont identifiées par leur type dit en « C3, C4 ou CAM ». Issus des sollicitations (intensité d'irradiation et température), ces types caractérisent la stratégie mise en œuvre pour la fixation du CO_2 par la plante³², laquelle induit des stratégies de gestion thermique spécifiques, impactant par conséquent l'usage de la transpiration à des fins de rafraîchissement.

Les plantes en C4 ont tendance à transpirer au plus fort des sollicitations, alors que sous l'influence d'une forte irradiation et d'une haute température les plantes de type C3 stoppent la transpiration. Enfin, les plantes en CAM ouvrent leurs stomates uniquement la nuit, limitant les besoins en eau.

Définie par le type, la régulation de la transpiration est effectuée *via* le contrôle de l'ouverture de l'ostiole. Situé en surface de l'épiderme (généralement sous la feuille), cet organe gère le débit de matière transitant entre l'air extérieur et le stomate, chambre dans laquelle l'eau est évaporée. À noter qu'un faible débit est présent même en état « fermé ».

32. Il existe trois stratégies photosynthétiques pour la formation de sucres (saccharose ou amidon) par la plante : Dans le cycle de CALVIN les plantes en C3 utilisent des molécules à 3 carbones, elles sont généralement présentes en milieu tempéré. Les plantes en C4 utilisent une molécule à 4 carbones (en plus des molécules à 3 carbones) pour la formation de leurs sucres. Elles sont généralement présentes en milieu tropical et « particuliers » (sols salés, *etc.*). Enfin, les plantes de type CAM (pour *Crassulacean Acid Metabolism*) sont identiques aux C4, mais possèdent une assimilation nocturne du CO_2 pour une utilisation diurne (*via* un stockage dans des acides localisés dans les stomates). Elles sont généralement présentes en milieu aride.

3.3.3.3.2 Formalisme

Qu'il soit positionné dans le milieu matériel (Q_{Tr}^m) ou dans le fluide à sa surface (Q_{Tr}^f), le débit de vapeur d'eau transpiré par la plante (Q_{Tr}) est basé sur le potentiel de pression partielle en vapeur d'eau libérable par la plante ($P_{v,sf}^{sat} - P_{v,air}$), et pondérée par des résistances à cette libération : la résistance aérodynamique (r_a) et la résistance stomatique (r_{st}). L'équation 3.75 présente le modèle, dans lequel $\varepsilon_m = 0.6219$, P_{air} est la pression atmosphérique locale en [Pa] et où $\Delta P_v = P_{v,1}^{sat} - P_{v,2}$ est la condition³³ indiquant le domaine de validité (est nul sinon).

$$Q_{Tr}(z, t) = \frac{LAI \varepsilon_m \rho_{air}(z, t)}{P_{air}(z, t) [r_a(z, t) + r_{st}(z, t)]} \left[P_{v,sf}^{sat}(z, t) - P_{v,air}(z, t) \right] \Big|_{\Delta P_v > 0} \quad (3.75)$$

La considération du type de plante est effectuée par la résistance de la canopée (modélisée *via* « $r_a + r_{st}$ »). Selon STAHHGHELLINI [1987] le comportement apparent de cette résistance est gouverné quasiment exclusivement par la résistance stomatique.

3.3.3.3.3 L'évaporation

L'évaporation peut avoir lieu en surface (Q_{Ev}^d) et dans le milieu matériel considéré (Q_{Ev}^m). Dans ces deux cas, l'approche est similaire, seul le choix des paramètres diffère. À noter que l'évaporation est conceptuellement très proche de la transpiration (d'où la similarité des formulations). La nuance réside dans la surface observée, il s'agit de la surface libre de l'eau pour l'évaporation alors que pour la transpiration c'est la surface de la feuille.

Le débit hygrique associé est obtenu *via* le potentiel³⁴ de pression partielle en vapeur d'eau libérable par la surface libre de l'eau liquide considérée ($P_{v,s}^{sat} - P_{v,air}$). Elle est pondérée par la résistance aérodynamique au transfert de vapeur d'eau induite par le milieu (r_a) ou bien par la résistance à la vaporisation issue de l'état de surface ($r_{s,ev}$). Le modèle est explicité par l'équation 3.76. Cette équation est valide³³ tant que $\Delta P_v > 0$.

$$Q_{Ev}(z, t) = \frac{\varepsilon_m \rho_{air}(z, t)}{P_{air}(z, t) [r_a(z, t) + r_{s,ev}(z, t)]} \left[P_{v,s}^{sat}(z, t) - P_{v,air}(z, t) \right] \Big|_{\Delta P_v > 0} \quad (3.76)$$

Nota : Dans le cas de l'évaporation d'eau interceptée par la feuille (donc sur sa face supérieure) et de la transpiration de cette dernière (face inférieure), la résistance aérodynamique est considérée identique pour ces deux équations.

3.3.3.3.4 La condensation

La condensation apparaît lorsque la température du fluide est inférieure à la température de rosée (Cf. annexe F). Dans notre étude, la condensation peut apparaître aux surfaces des milieux solides (Q_{Cd}^d , ex : feuilles) ou en leurs seins (Q_{Cd}^m , ex : substrat). La formulation est la même, seule l'appréciation du volume d'air humide considéré les distinguent.

Le débit massique surfacique d'eau condensée (Q_{Cd}^m ou Q_{Cd}^d) peut être obtenu par une formulation très proche de celle de l'évaporation dans laquelle seule la résistance de surface associée à l'évaporation est remplacée par la résistance de surface à la condensation $r_{s,cd}$. L'équation 3.77 explicite cette relation, dans laquelle P_{air} est la pression atmosphérique locale exprimée en [Pa], obtenue grâce à la loi de DALTON : $P = P_{air}^{sec} + P_v$. Cette équation est valide³³ tant que $\Delta P_v = P_{v,air} - P_{v,s}^{sat} < 0$.

$$Q_{Cd}(z, t) = \frac{\varepsilon_m \rho_{air}(z, t)}{P_{air}(z, t) [r_a(z, t) + r_{s,cd}(z, t)]} \left[P_{v,air}(z, t) - P_{v,s}^{sat}(z, t) \right] \Big|_{\Delta P_v < 0} \quad (3.77)$$

33. $\Delta P_v = P_{v,1}^{sat} - P_{v,2}$: condition nécessaire lors de l'implémentation, car si le pas de temps utilisé est important il est possible que numériquement $P_{v,1}^{sat} < P_{v,2}$, ce qui est physiquement impossible à température identique.

34. Dans une approche semi-détaillée, les valeurs de $P_{v,air}$ et $P_{v,s}^{sat}$ sont prises pour une même maille du milieu considéré ; contrairement à une approche simplifiée qui utilise la pression partielle de l'air extérieur.

3.4 Les paramètres botaniques

Quelle que soit l'approche utilisée pour la modélisation de la canopée (condition aux limites ou couche matérielle), l'étude d'une PCV nécessite la considération de paramètres clefs liés à la végétation. Il s'agit principalement du LAI et de la résistance stomatique.

Nota : bien qu'étant le paramètre possédant l'impact le plus important le taux de couverture n'est pas abordé ici, car considéré à 100% selon l'hypothèse 14.

3.4.1 L'indice de surface foliaire

3.4.1.1 Le LAI

Paramètre caractéristique de la canopée, le LAI³⁵ est classiquement défini par une valeur empirique. Toutefois, des modèles existent pour des végétations particulières. C'est notamment le cas pour le gazon (tondu) : ALLEN et al. [1998] propose $LAI = 24h$, avec h la hauteur du gazon. Cependant, cette approche ne correspond pas à notre cas d'étude, car le *zoysia tenuifolia* est bien trop dense, et surtout, car cette forte densité induit la présence d'une feuille uniquement sur une fraction de sa hauteur (quelques centimètres). Ainsi, le végétal possédant des feuilles dont la distribution et les caractéristiques sont considérées uniformes, le modèle suivant a été mis en place :

$$LAI = H_f L_f N_{b,f} \quad (3.78)$$

$$N_{b,f} = \frac{(1 - P_c)}{E_f L_f} \quad (3.79)$$

Où $N_{b,f}$ correspond au nombre de feuilles dans la canopée par unité de surface, P_c est la porosité de la canopée, E_f l'épaisseur moyenne d'une feuille, L_f la largeur moyenne d'une feuille et H_f la hauteur de la canopée active (possédant des feuilles vertes).

3.4.1.2 Le LAD

Les notions de $LAD(z)$ (eq. 3.81) et $LAD_{\Delta z}$ (eq. 3.80) réfèrent tous deux à une approche spécifique de subdivision du LAI. À noter que l'équation 3.80 est définie pour une distribution verticale homogène. Avec Δz la discrétisation, h la hauteur de la canopée et $e(z)$ l'épaisseur de canopée considérée (depuis la face externe, *i.e.* supérieure).

$$LAD_{\Delta z} = LAI \frac{\Delta z}{h} \quad (3.80) \quad LAD = LAI \frac{e(z)}{h} \quad (3.81)$$

3.4.2 La résistance stomatique

Paramètre clef de la transpiration, la modélisation de la résistance stomatique (r_{st}) n'est pas chose aisée. Selon DAMOUR et al. [2010], parmi les modèles³⁶ de type climatique, tous ceux ayant la précision souhaitée nécessitent l'usage de 5 à 10 paramètres, ainsi qu'une importante adaptation des constantes. Le modèle choisi est basé sur les travaux de PALOMO DEL BARRIO [1998] et TABARES-VELASCO et SREBRIC [2012]. Il fait intervenir uniquement les principaux paramètres influant sur l'ouverture des stomates, limitant ainsi le nombre de constantes empiriques ; il s'agit de l'irradiation solaire, la température de la feuille, le potentiel associé à la pression partielle en vapeur d'eau entre la surface de la feuille et l'air extérieur, la teneur en eau du substrat et la teneur en CO_2 . Comme l'explicite l'équation 3.82, les modèles de type multiplicatif sont basés sur des fonctions $\{f_i\}$ adimensionnelles et définies sur $[1; +\infty[$. Cette description est valide

35. Cf. chapitre 2, section 2.2.3.2

36. Il existe un grand nombre de modèles permettant de définir la résistance stomatique (classiquement abordée comme une conductance en agronomie), mais très peu sont adaptées à un code de simulation en physique du bâtiment. Il existe trois familles de modèles, ceux basés sur les conditions climatiques (petit nombre), sur l'activité photosynthétique, ou bien sur la régulation de la turgescence des cellules de garde (membranes composant l'ostiole, gérant l'ouverture du stomate) [DAMOUR et al., 2010].

uniquement sous l'hypothèse d'indépendance des paramètres, *i.e.* si les $\{f_i\}$ ne sont pas corrélés, ce qui induit la nécessité d'une covariance nulle.

Bien que la plus utilisée en physique du bâtiment par les modèles semi-détaillés, cette approche est source de critiques vis-à-vis de du fait de l'indépendance supposée entre les facteurs [DAMOUR, 2008]. Toutefois, cette approche est utilisée ici, car, d'une part, elle donne des résultats possédant la précision recherchée et d'autre part, car elle possède une complexité cohérente avec un modèle semi-détaillé.

$$r_{st} = r_{st}^{min} f_1(\varphi_{CLO}) f_2(T_f) f_3(P_{v,sf}^{sat} - P_{v,air}) f_4(\omega_s) f_5(CO_2) \quad (3.82)$$

Avec

$$f_1(z, t) = 1 + \exp(-A * (\varphi_{Ir} \alpha_{CLO} - B)) \quad (3.83)$$

$$f_2(z, t) = \frac{1}{C - D (35 - T_f)^2} \quad (3.84)$$

$$f_3(z, t) = \frac{1}{1 - E \log(P_{v,sf}^{sat} - P_{v,air}) + E \log(1000)} \quad (3.85)$$

$$f_4(z, t) = \begin{cases} 1 & \text{Si } \bar{\omega} > 0,7 \omega_{st} \\ \frac{0,7 \omega_{st} - \omega_f}{\bar{\omega} - \omega_f} & \text{Si } \omega_f < \bar{\omega} < 0,7 \omega_{st} \\ 1000 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (3.86)$$

$$f_5(z, t) = 1 + F (C_{CO_2} - 200)^2 \quad (3.87)$$

Où $\{A, B, C, D, E, F\}$ sont des paramètres constants et où $\{\bar{\omega}, \omega_{st}, \omega_f\}$ sont les teneurs en eau du substrat : moyenne (spatialement), à partir de laquelle la plante ressent un stress hydrique et à partir de laquelle la plante commence à faner, respectivement.

Remarque : la fonction f_5 nécessite la concentration en CO_2 dans l'air (C_{CO_2}), valeur classiquement absente des fichiers météorologiques utilisés en physique du bâtiment. C'est la raison pour laquelle la résistance stomatique est souvent modélisée sans ce paramètre dans les codes de physique du bâtiment (bien qu'il ait un rôle significatif [PALOMO DEL BARRIO, 1998]).

3.4.3 La résistance aérodynamique

Il existe dans la littérature autant de formulation de la résistance aérodynamique que d'étude l'utilisant. La forme la plus générique est celle proposée par PALOMO DEL BARRIO [1998] (eq. 3.88). Avec L_f la longueur caractéristique des feuilles de la canopée, V_t la vitesse du vent au dessus de la canopée (cime) et où les $\{\xi_i\}$ sont des paramètres constants.

$$r_a^t = \frac{\xi_1 L_f^{\xi_2}}{\left[L_f |\bar{T}_f - \bar{T}_a| + \xi_3 V_t^2 \right]^{-\xi_4}} \quad (3.88)$$

3.5 Couplage des transferts de chaleurs et de masse

Tous les phénomènes décrits impactent leurs champs respectifs et *in fine* le champ thermique. Afin de permettre la modélisation de chacun de ces champs, il est nécessaire d'adopter une stratégie de couplage de ces différents modes de transferts.

— *L'advection* —

Localisé dans les couches fluides, le phénomène d'advection induit un transfert thermique considéré *via* un bilan d'énergie sensible (eq. 3.89). Celui-ci est basé sur le débit advectif hygrique

(Q_{Ad}^f) , qui prend en considération la vitesse de vent (sec. 3.3.3.2.2). Avec Δx : la distance caractéristique entre le nœud de fluide (T_f) et la température d'air extérieur (T_{ae}).

$$\begin{aligned}\varphi_{Ad}^f(z, t) &= Q_{Ad}^f(z, t) c_{p, H_2O} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{ae} \\ &= \frac{Q_{Ad}^f(z, t) c_{p, H_2O}}{\Delta x} [T_{ae}(z, t) - T_f(z, t)]\end{aligned}\quad (3.89)$$

— *Les changements de phase* —

Les changements de phases (évaporation, condensation et transpiration) sont localisés en surface ou au sein d'une couche matérielle. Ils sont considérés *via* le calcul des débits de vapeur d'eau. Les flux thermiques associés sont obtenus par application de l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau (h_v).

$$\varphi_{Ev} = h_v Q_{Ev}(z, t) \quad \varphi_{Cd} = h_v Q_{Cd}(z, t) \quad \varphi_{Tr}(z, t) = h_v Q_{Tr}(z, t) \quad (3.90)$$

Nota : l'enthalpie massique de condensation est dépréciée au profit de l'enthalpie massique de vaporisation afin d'obtenir un flux positif. Le sens des flux étant géré lors du bilan (eq. 3.1).

Les flux hydriques associés sont obtenus par application de la masse volumique de l'eau liquide (ρ_{H_2O}).

$$\dot{E}_{H_2O}(z, t) = \frac{Q_{Ev}(z, t)}{\rho_{H_2O}} \quad \dot{C}_{H_2O}(z, t) = \frac{Q_{Cd}(z, t)}{\rho_{H_2O}} \quad (3.91)$$

— *L'absorption par les racines* —

L'absorption par les racines ($\dot{Q}_{H_2O}^m$) représente l'un des débits les plus importants (selon les conditions climatiques, la composition et le type de plante). Sous l'hypothèse que la végétation consomme l'eau uniquement pour la gestion de sa température interne, l'absorption par les racines est définie par le débit massique surfacique de vapeur d'eau perdue par transpiration. L'équation 3.92 exprime cette relation.

$$\dot{Q}_{H_2O}^m = \frac{Q_{Tr}(z, t)}{\rho_{H_2O}} \quad (3.92)$$

Le débit absorbé est alors réparti sur l'épaisseur de substrat où se trouvent les racines. Cette hypothèse est définie selon la végétation en présence, son développement ainsi que la conception de la PCV.

Section 4

Modèles physiques

La représentation du système physique et les formalismes des transferts en présence ayant été définis, la conceptualisation des systèmes étudiés va être présentée, permettant dès lors leurs mises en équation (basés sur les principes de conservation énergétiques et massiques). Les modèles résultants seront ensuite numérisés en vue d'être implémentés.

4.1 Représentation du système

La représentation conceptuelle d'un système d'étude consiste à traduire la réalité physique (ex. : paroi) en un ensemble d'éléments abstraits (couche, maille, zone thermique, *etc.*) possédant des propriétés spécifiques (homogénéité, opacité, *etc.*). Une fois organisés et hiérarchisés, ces éléments forment un système conceptuel¹, à partir duquel le modèle peut dès lors être établi.

L'abstraction du système d'étude conduit donc, par le biais d'hypothèses, à définir les éléments le composant, ainsi que leurs propriétés. La finalité de notre étude étant l'obtention d'un modèle physique de type semi-détaillé, l'une des hypothèses principales est dès lors l'homogénéité des milieux considérés. Une fois la question de l'homogénéisation traitée, des éléments abstraits tels que la notion de couche et d'interface apparaît, nécessitant la définition de leurs propriétés. Puis, les transferts supposés prédominants sont sélectionnés. Afin de visualiser le concept établi, une représentation de leurs présences et interactions est proposée par l'intermédiaire d'une analogie thermo-hydro-hygro-électrique. Enfin, les phénomènes associés aux transferts considérés sont synthétisés en vue du choix de leurs modélisations individuelles.

4.1.1 Les couches

Les approches conceptuelles associées aux quatre cas d'études sont représentées par la figure 4.1. Les descriptions des concepts associés à chacune des couches sont définies ci-dessous :

- A Composition : tôle. Milieu macroscopique considéré : solide, inerte, opaque, continu, homogène et isotrope. Les transferts thermiques sont présents en son sein, alors que les transferts hydriques et hygriques sont nuls.
- B Composition : scories. Milieu macroscopique considéré : poreux (matrice consolidée, macropores, fluide : air), inerte, opaque, continu, homogène et isotrope. Les transferts thermiques et aérauliques sont présents en son sein.
- C Composition : scories+terreau. Milieu macroscopique considéré : poreux (matrice consolidée, macropores, fluide : eau liquide), inerte, opaque, continu, homogène, et isotrope. Les

1. *i.e.* une description plus ou moins simplifiée du système d'étude

transferts thermiques, hydriques et hygriques sont présents en son sein.

- D Composition : canopée. Milieu macroscopique considéré : opaque, continu, homogène, isotrope et dont les propriétés biologiques sont constantes. Les transferts thermiques, hygriques sont présents en son sein (dont la transpiration). Également présents, les transferts hydriques dans la couche se résument à la conduction gravitaire.
- E Composition : lame d'air. Milieu macroscopique considéré : fluide, transparent, continu, homogène, et isotrope (pas d'aérosols). Les transferts thermiques, hydriques, hygriques et aérauliques sont présents en son sein. Considérée comme une lame d'air non confinée, la canopée influe sur l'advection. N'impacte pas les rayonnements de type CLO ou GLO.
- F Composition : canopée. Milieu macroscopique considéré : mixte (végétal/air), semi-transparent multi-réfléctif, homogène, isotrope, continu et dont les propriétés biologiques sont constantes. Les transferts thermiques, hydriques, hygriques et aérauliques sont présents en son sein (dont la transpiration).

À noter que dans une approche semi-détaillée le choix a été fait de discrétiser toutes les couches selon un maillage composé de trois nœuds pour chacun des champs thermique, hydrique et hygrique.

Une attention particulière est apportée quant au milieu type F : dans celui-ci l'hypothèse d'une température identique pour l'air et les feuilles n'est pas valide². De ce fait, leurs champs thermiques sont dissociés et couplés *via* la convection (visible sur la figure 4.3). Par ailleurs, seul le champ hygrique associé à l'air est modélisé, car la pression partielle en vapeur d'eau au contact des feuilles est supposée toujours à saturation.

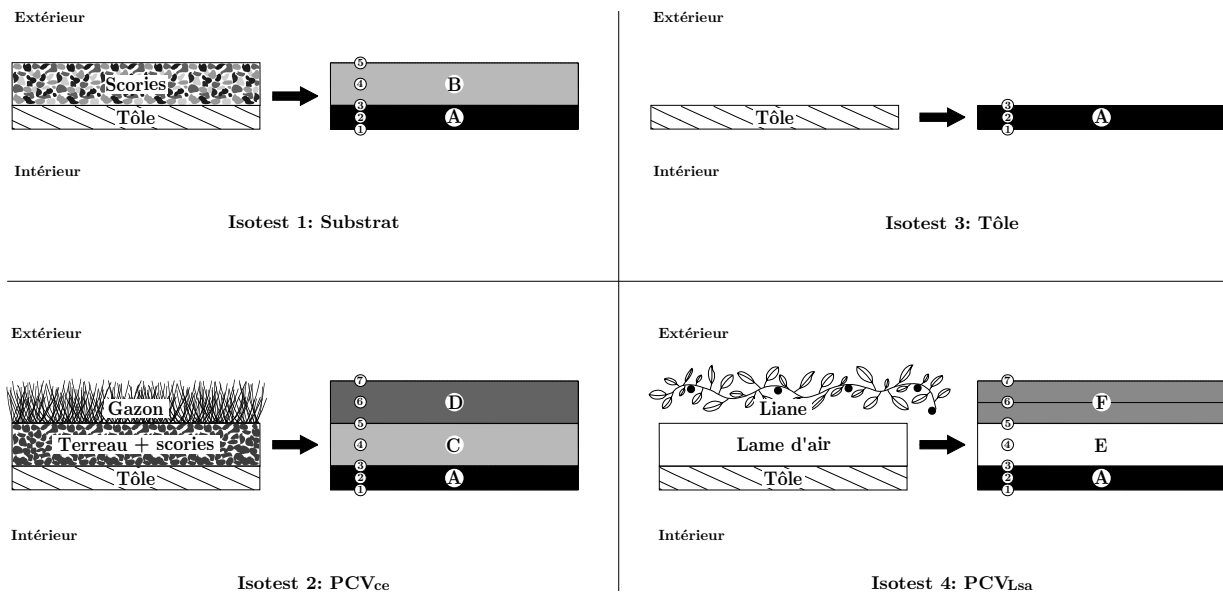


Figure 4.1 – Approche conceptuelle des cas d'études (en toiture des modules ISOTEST).

4.1.2 Les frontières et liaisons

La notion de couche définie précédemment induit la notion d'interface, qui peut être qualifiée de condition aux limites de la paroi ou de liaison intercouche.

2. Surtout pour la partie supérieure de la canopée. Basé sur une observation expérimentale faite par mesure du rayonnement infrarouge de la canopée.

Aux frontières de ces parois, les conditions aux limites sont au nombre³ de deux, respectivement positionnées sur leurs surfaces interne et externe. La considération des conditions aux limites est identique pour la surface interne : la présence d'une lame d'air confinée induit les phénomènes de convection (puisque paroi inclinée) ainsi que de transferts radiatifs avec les autres parois (spectre GLO). Pour la surface externe, les phénomènes en présence et leurs intensités sont fonction du type de milieu et de leurs caractéristiques :

ISOTEST 1 : Substrat Convection thermique forcée, rayonnement de type CLO et GLO.

ISOTEST 2 : PCV_{ce}Th Convection thermique et hygrique forcée, rayonnement de type CLO et GLO, intrants liquides (irrigation et précipitation).

ISOTEST 3 : Tôle Convection thermique forcée, rayonnement de type CLO et GLO.

ISOTEST 4 : PCV_{Lsa}Th Convection thermique et hygrique forcée, rayonnement de type CLO et GLO (tracé de rayon).

Plus globalement, les conditions aux limites interne et externe pour les quatre cas d'études sont de type NEUMAN.

Enfin, pour ce qui est des liaisons entre les couches d'une même paroi, celles-ci sont de type NEUMAN liaison dynamique⁴ (Nld) pour tous les champs considérés. À noter que la tôle ne permettant pas les transferts de type hydrique ou hygrique, la liaison pour ces champs s'assimile à une condition aux limites de type DIRICHLET (*i.e.* un type Nld pour lequel la conductivité est nulle).

4.2 Modèles thermiques

4.2.1 Dans les couches solides

Les couches solides sont constituées par des milieux continus et notés c . Dans notre étude il s'agit du milieu A : la tôle en acier. Il n'y a donc ni évaporation, ni condensation, ni transferts massiques.

$$\varphi_{St}^c = \varphi_{Dt}^c \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\lambda_c}{\rho_c c_{p,c}} \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} \quad (4.1)$$

4.2.2 Dans les couches fluides

Comme leur nom l'indique, les couches fluides, notées f , sont uniquement composées d'un gaz ou d'un liquide. Dans notre étude il s'agit du milieu E : la lame d'air présente entre la canopée et le substrat.

$$\varphi_{St}^f = \varphi_{Dt}^f + \varphi_{Ad}^f \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\lambda_f}{\rho_f c_{p,f}} \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} + \frac{Q_{Ad}^f(z, t) c_{p, H_2O}}{\rho_f c_{p,f} \Delta x} [T_{ae} - T_f] \quad (4.2)$$

Avec Δx la distance caractéristique entre le nœud de fluide (T_f) et d'air extérieur (T_{ae}).

4.2.3 Dans les couches poreuses

Les couches poreuses, notées p , sont constituées d'une matrice structurale (solide) dans laquelle circule un ou plusieurs fluides (air, eau liquide, vapeur, *etc.*). En plus des paramètres thermophysiques, le milieu est défini par sa porosité et sa perméabilité. Dans le cas de notre étude, il s'agit des milieux B et C : les substrats composés de scories et de scories+terreau, respectivement. Suite à l'homogénéisation, les paramètres thermophysiques utilisés sont de types équivalents.

3. Dans une approche semi-détaillée, les cas d'études sont modélisés selon une unique dimension : l'axe vertical (orienté vert le haut).

4. Ce type de liaison a été spécifiquement défini pour les besoins de la thèse dans la section 3.

— Milieu B : scories —

Composé de scories, le milieu B nécessite de considérer la conductivité aéraulique en plus des phénomènes présents pour le milieu A (non irrigué les changements de phases sont négligés).

$$\varphi_{St}^p = \varphi_{Dt}^p + \varphi_A^p \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\lambda_p}{(\rho c_p)_p} \frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} + \frac{(\rho c_p)_f}{(\rho c_p)_p} v_z \frac{\partial T_p}{\partial z} \quad (4.3)$$

— Milieu C : scories+terreau —

Composé de scories+terreau, le milieu C ne prend pas en compte la conductivité aéraulique (puisque le terreau bouche les pores). De plus, situé sur l'ISOTEST 2 ce milieu subit l'irrigation aérienne mise en œuvre pour les plantes.

Selon l'hypothèse 8, les apports sensibles associés au transfert massique sont négligés⁵. Le bilan thermique au sein du substrat est donc basé sur le stockage, la diffusion thermique, l'évaporation et, la condensation.

$$\varphi_{St}^p = \varphi_{Dt}^p + \varphi_{Cd}^p - \varphi_{Ev}^p \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\lambda_m}{\rho_m c_{p,m}} \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} + \frac{S_u}{V_u} \left[h_v Q_{Cd}^m - h_v Q_{Ev}^m \right] \quad (4.4)$$

4.2.4 Dans les couches végétales

Les couches végétales, notées v , sont des milieux mixte pouvant, à certains égards, être considérés comme poreux : constituées d'une matrice non consolidée (végétale) dans laquelle circule un ou plusieurs fluides (air+vapeur, eau liquide). Dans le cas de notre étude, il s'agit des milieux D et F : les canopées du gazon et de la liane, respectivement.

Remarque : aux vues des propriétés mécaniques, ces milieux sont considérés selon deux approches différentes. D'une grande densité et d'une grande homogénéité, le gazon (*zoysia tenuifolia*) est conceptualisé comme une couche matérielle opaque continue et susceptible de transpirer. Alors que la liane (*tristellateia australasiae*), bien plus aérée, elle possède une transmittance non négligeable et la différence de température entre les feuilles et l'air est trop importante⁶ pour les considérer équivalentes. De ce fait, la liane est modélisée comme un milieu multicouche semi-transparent (induisant des inter-réflexions) possédant chacune une feuille équivalente⁷ immergée dans un fluide.

— Milieu D : le gazon —

$$\varphi_{St}^v = \varphi_{Dt}^v \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial T_v}{\partial t} = \frac{\lambda_v}{(\rho c_p)_v} \frac{\partial^2 T_v}{\partial z^2} \quad (4.5)$$

Où les paramètres thermophysiques sont définis *via* les équations 3.14 à 3.16.

— Milieu F : la liane —

Se basant sur les remarques d'ALEXANDRI et JONES [2007], la canopée est un milieu diphasique dont il est nécessaire de dissocier chacune des composantes. Ainsi, le suivi des champs de température de l'air et de la surface des feuilles est opéré. Les indices des températures associées sont respectivement a et sf .

Les feuilles :

$$\varphi_{St}^v = \varphi_{Cv}^v + \varphi_{Rd}^{v,net} - \varphi_{Tr}^v + \varphi_{Cd}^v - \varphi_{Ev}^v \quad (4.6)$$

5. Aux vues des courbes de flux et de températures obtenues expérimentalement, cette hypothèse est fallacieuse lors de l'irrigation vis-à-vis du flux stocké, mais adéquate pour le flux adducté sous la tôle (fig. 6.1).

6. L'écart de température est de l'ordre de 5°C à 12h00 TSV.

7. Pas de continuité matérielle pour les feuilles équivalentes, donc pas de transfert conductif entre elles.

$$\frac{\partial T_{sf}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_v c_{p,v} \bar{e}_p} \left[\text{LAI} h_{cv}^t (T_a - T_{sf}) + \varphi_{CLO}^{v,net} + \varphi_{GLO}^{v,net} + h_v (Q_{Cd}^v - Q_{Tr}^v - Q_{Ev}^v) \right] \quad (4.7)$$

Avec \bar{e}_p l'épaisseur moyenne des feuilles, et où $\varphi_{CLO}^{v,net}$ et $\varphi_{GLO}^{v,net}$ sont obtenus en amont par tracé de rayon, et où S_u et V_u sont les surfaces et volumes unitaires.

L'air :

$$\varphi_{St}^v = \varphi_{Dt}^v - \varphi_{Cv}^v \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{\lambda_v}{\rho_v c_{p,v}} \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} - \frac{\text{LAI} h_{cv}^t}{\rho_v c_{p,v} \bar{e}_p} (T_a - T_{sf}) \quad (4.8)$$

4.2.5 Aux interfaces

Dans les paragraphes suivants, les exposants 1, 2 et i correspondent aux couches 1 et 2 en présence ainsi qu'à leurs interfaces. *Nota* : Le couplage multiéchelle entre les approches nodales et de champ se fait *via* les interfaces internes et externes, raison pour laquelle la couche fluide (interne ou externe) n'est pas considérée dans les bilans.

— *Interne et externe* —

D'un point de vue thermique, les bilans aux interfaces interne et externe sont basés sur les phénomènes suivant⁸ :

$$\varphi_{St}^1 = \varphi_{Cv}^i + \varphi_{Rd}^i - \varphi_{Ev}^i + \varphi_{Cd}^i + \varphi_{Dt}^1 + \varphi_{Cv}^1 - \varphi_{Ev}^1 + \varphi_{Cd}^1 - \varphi_{Tr}^1 + \varphi_A^1$$

Les formulations des phénomènes radiatifs GLO sont explicitées par les équations 3.24 et F.18, respectivement pour les surfaces internes et externes. Les phénomènes convectifs, quant à eux, sont formulés par les équations F.7 pour la face interne, F.8 pour la face externe de l'ISOTEST 1, F.10 pour la face externe de l'ISOTEST 4 ainsi que F.6 pour la face externe des l'ISOTEST 2 et 3. La diffusion et le stockage sont définis par ceux explicités pour la couche $|_1$ dans l'équation 3.10 (les termes $|_2$ ne sont pas considérés dû à l'approche nodale en dehors de la paroi). La conduction aéraulique est indiquée dans l'équation 3.17, alors que la convection dans la canopée est définie par l'équation F.12. Enfin, les termes d'évaporation, de condensation et de transpiration sont modélisés par les équations 3.90.

— *Liaisons inter-couches* —

D'un point de vue thermique, les bilans aux interfaces interne et externe sont basés sur les phénomènes suivants⁸ :

$$\varphi_{St}^1 + \varphi_{St}^2 = \varphi_{Dt}^1 + \varphi_{Dt}^2 - \varphi_{Ev}^1 - \varphi_{Ev}^2 + \varphi_{Cd}^1 + \varphi_{Cd}^2 + \varphi_A^1 + \varphi_{Cv}^i + \varphi_{Rd}^i$$

Basés sur un couplage de type NEUMAN liaison dynamique, les termes diffusifs et de stockages sont explicités par l'équation 3.10. Les phénomènes d'évaporation, de condensation et de transpiration sont formulés par les équations 3.90. Enfin, la conduction aéraulique et la convection sont abordées par les équations 3.17 et F.15. Le rayonnement en surface de la tôle sous la canopée est obtenu par tracé de rayon, dissociant les spectres CLO et GLO.

4.3 Modèles hydriques

4.3.1 Dans les couches solides

Il n'y a pas de transfert massique.

$$\dot{S}_{H_2O}^c = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial \omega_c}{\partial t} = 0 \quad (4.9)$$

4.3.2 Dans les couches fluides

Selon les hypothèses posées, il n'y a pas d'eau sous forme d'aérosols (hyp. 1) dans les couches fluides.

$$\dot{S}_{H_2O}^f = \dot{C}_{H_2O}^f \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial \omega_f}{\partial t} = \frac{dK_{f,l}}{d\omega} \frac{\partial \omega_f}{\partial z^*} \cos \alpha \quad (4.10)$$

8. Tous les phénomènes ne son pas nécessaires pour tous les bilans aux interfaces., Cf. tableau 4.1

Où la valeur de $K_{f,l}$ permet de retranscrire la vitesse d'écoulement de l'eau liquide dans la lame d'air ($K_{f,l} \sim 1 m.s^{-1}$).

4.3.3 Dans les couches poreuses

— Milieu B : scories —

$$\text{Il n'y a pas de transfert massique.} \quad \dot{S}_{H_2O}^p = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial \omega_p}{\partial t} = 0 \quad (4.11)$$

— Milieu C : scories+terreau —

Selon les hypothèses, l'arrosage est aérien 10, il n'y a donc pas d'intrant contrôlé dans le substrat. Le bilan hydrique au sein de la couche est alors basé sur l'eau stockée, diffusée, évaporée, condensée, absorbée par les racines et sur les pertes gravitaires.

$$\begin{aligned} \dot{S}_{H_2O}^p &= \dot{D}_{H_2O}^p + \dot{C}_{H_2O}^p + \dot{C}_{H_2O}^p - \dot{E}_{H_2O}^p - \dot{Q}_{H_2O}^p \\ &\Updownarrow \\ \frac{\partial \omega_p}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{p,l} \frac{\partial \omega_p}{\partial z} \right] + \frac{d K_{p,l}}{d \omega} \frac{\partial \omega_p}{\partial z^*} \cos \alpha \\ &\quad + \frac{S_u}{V_{H_2O,p}^{sat}} \frac{Q_{Cd}^p}{\rho_{H_2O}} - \frac{S_u}{V_{H_2O,p}^{sat}} \frac{Q_{Ev}^p}{\rho_{H_2O}} - \frac{S_u}{V_{H_2O,p}^{sat}} \frac{Q_{Tr}^v}{\rho_{H_2O}} \end{aligned} \quad (4.12)$$

4.3.4 Dans les couches végétales

La présence de l'eau liquide dans la canopée est abordée différemment selon le cas d'étude. Pour l'ISOTEST 2, l'eau interceptée par la canopée est localisée à sa surface uniquement, *i.e.* toute l'eau qui entre dans la couche se retrouve sur le substrat. Pour l'ISOTEST 4, l'eau est interceptée par toute la canopée. Il est donc nécessaire de considérer le champ de teneur en eau pour la conduction gravitaire dans la canopée ainsi que la teneur en eau stockée sur les feuilles.

— Milieu D : le gazon —

$$\text{Il n'y a pas de transfert massique.} \quad \dot{S}_{H_2O}^v = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial \omega_v}{\partial t} = 0 \quad (4.13)$$

— Milieu F : la liane —

Les feuilles :

$$\begin{aligned} \dot{S}_{H_2O}^v &= \dot{I}_{H_2O}^v + \dot{C}_{H_2O}^v - \dot{E}_{H_2O}^v \\ &\Updownarrow \\ \frac{\partial \omega_v}{\partial t} &= \frac{S_u}{V_{H_2O}^{sat}} \left[\kappa \left[1 - \frac{It}{It^{max}} \right] A_{H_2O}^{ex} + \frac{Q_{Cd}^v}{\rho_{H_2O}} - \frac{Q_{Ev}^v}{\rho_{H_2O}} \right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

L'air :

$$\dot{S}_{H_2O}^v = \dot{C}_{H_2O}^v \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial \omega_v}{\partial t} = \frac{d K_{v,l}}{d \omega} \frac{\partial \omega_v}{\partial z^*} \cos \alpha \quad (4.15)$$

Où $K_{v,l}$ permet de retranscrire la cinétique du transfert de l'eau liquide dans la canopée.

4.3.5 Aux interfaces

— Interne et externe —

D'un point de vue hydrique, les bilans aux interfaces interne et externe sont basés sur les phénomènes suivant⁸ :

$$\dot{S}_{H_2O}^i = \dot{A}_{H_2O}^{ex} - \dot{E}_{H_2O}^i + \dot{C}d_{H_2O}^i + \dot{C}_{H_2O}^1 - \dot{E}_{H_2O}^1 + \dot{C}d_{H_2O}^1 + \dot{I}t_{H_2O}^1$$

Chacun de ces phénomènes sont présent sans équivoque dans la section 3.3.2.

— *Liaisons inter-couches* —

D'un point de vue hydrique, les bilans aux interfaces interne et externe sont basés sur les phénomènes suivants⁸ :

$$\dot{S}_{H_2O}^i = \dot{D}_{H_2O}^1 + \dot{D}_{H_2O}^2 + \dot{C}_{H_2O}^1 + \dot{C}_{H_2O}^2 + \dot{C}d_{H_2O}^1 + \dot{C}d_{H_2O}^2 - \dot{E}_{H_2O}^1 - \dot{E}_{H_2O}^2 - \dot{Q}_{H_2O}^1 - \dot{Q}_{H_2O}^2 + \dot{I}t_{H_2O}^1 - \dot{R}_{H_2O}^i$$

Où les phénomènes de diffusion et de conduction gravitaire sont formulés par l'infiltration : équation 3.47 (selon l'approche NEUMAN liaison dynamique). L'évaporation et la condensation sont explicitées par les équations 3.91, alors que l'absorption par les racines et le ruissellement en surface de la couche 1 sont formulés par les équations 3.92 et 3.56.

4.4 Modèles hygriques

4.4.1 Dans les couches solides

$$\text{Il n'y a pas de transfert massique.} \quad Q_{St}^c = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial W_c}{\partial t} = 0 \quad (4.16)$$

4.4.2 Dans les couches fluides

L'absence d'aérosols induit l'absence d'évaporation et de condensation. Seuls le stockage, la diffusion et l'advection sont considérés. Selon l'hypothèse 4, la diffusivité hygrique ($D_{f,g}$) est constante, ce qui permet de faire apparaître clairement le laplacien.

$$Q_{St}^f = Q_D^f + Q_{Ad}^f \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial W_f}{\partial t} = D_{f,g} \frac{\partial^2 W_f}{\partial z^2} + \frac{S_u}{m_{air}^{sec}} h_{ad}^g \cdot [P_{v,a} - P_{v,f}] \quad (4.17)$$

Où S_u correspond à la surface unitaire.

Nota : le coefficient d'advection (h_{ad}^g) est fonction de la couche considérée. En effet, la lame d'air est protégée de l'advection par la canopée alors que l'air extérieur non. L'obtention des coefficients associés est explicitée section 3.3.3.2.2.

4.4.3 Dans les couches poreuses

— *Milieu B : scories* —

$$\text{Il n'y a pas de transfert massique.} \quad Q_{St}^p = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial W_p}{\partial t} = 0 \quad (4.18)$$

— *Milieu C : scories+terreau* —

$$\begin{aligned} Q_{St}^m &= Q_D^m + Q_{Ev}^m - Q_{Cd}^m \\ &\Updownarrow \\ \frac{\partial W_m}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{m,g} \frac{\partial W_m}{\partial z} \right] + \frac{S_u}{m_{air}^{sec}} \frac{\varepsilon_m \rho_{air}}{P_{air} [r_a + r_s^{ev}]} \left[P_{v,s}^{sat} - P_{v,la} \right] \Big|_{\Delta P_v > 0} \\ &\quad - \frac{S_u}{m_{air}^{sec}} \frac{\varepsilon_m \rho_{air}}{P_{air} [r_a + r_s^{cd}]} \left[P_{v,la} - P_{v,s}^{sat} \right] \Big|_{\Delta P_v < 0} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Où $P_{v,la}$ correspond à la pression partielle en vapeur d'eau dans la lame d'air.

Avec $\Delta P_v = P_{v,1}^{sat} - P_{v,2}$ la condition indiquant le domaine de validité du produit considéré (est nul sinon).

4.4.4 Dans les couches végétales

L'humidité relative étant considérée continument à 100% au contact des feuilles, seul le champ hygrique associé à l'air dans la canopée est considéré.

— Milieu D : le gazon —

Bien que considéré sans convection, évaporation ou condensation, le gazon a la capacité de transpirer, d'où :

$$Q_{St}^v = Q_D^v + Q_{Tr}^v \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial W_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{v,g} \frac{\partial W_v}{\partial z} \right] + \frac{S_u}{m_{air}^{sec}} \frac{LAI \varepsilon_m \rho_{air}}{P_{air} [r_a + r_{st}]} \left[P_{v,sf}^{sat} - P_{v,air} \right] \Big|_{\Delta P_v > 0} \quad (4.20)$$

— Milieu F : la liane —

$$\begin{aligned} Q_{St}^v &= Q_D^v + Q_{Cv}^v + Q_{Tr}^v + Q_{Ev}^v - Q_{Cd}^v \\ &\Updownarrow \\ \frac{\partial W_v}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{v,g} \frac{\partial W_v}{\partial z} \right] + \frac{S_u}{m_{air}^{sec}} LAI h_{cv}^g \left[P_{v,air} - P_{v,sf} \right] \\ &\quad + \frac{S_u}{m_{air}^{sec}} \frac{LAI \varepsilon_m \rho_{air}}{P_{air} [r_a + r_{st}]} \left[P_{v,sf}^{sat} - P_{v,air} \right] \Big|_{\Delta P_v > 0} \\ &\quad + \frac{S_u}{m_{air}^{sec}} \frac{\varepsilon_v \rho_{air}}{P_{air} [r_a + r_s^{ev}]} \left[P_{v,sf}^{sat} - P_{v,air} \right] \Big|_{\Delta P_v > 0} \\ &\quad - \frac{S_u}{m_{air}^{sec}} \frac{\varepsilon_v \rho_{air}}{P_{air} [r_a + r_s^{cd}]} \left[P_{v,air} - P_{v,sf}^{sat} \right] \Big|_{\Delta P_v < 0} \end{aligned} \quad (4.21)$$

4.4.5 Aux interfaces

— Interne et externe —

D'un point de vue hygrique, les bilans aux interfaces interne et externe sont basés sur les phénomènes suivants⁸ :

$$Q_{St}^i = Q_{Cv}^i + Q_{Ev}^i - Q_{Cd}^i + Q_{Ev}^1 - Q_{Cd}^1 + Q_{Tr}^1$$

Chacun de ces phénomènes est présent sans équivoques dans la section 3.3.3.

— Liaisons inter-couches —

D'un point de vue hygrique, les bilans aux interfaces interne et externe sont basés sur les phénomènes suivant⁸ :

$$Q_{St}^i = Q_D^1 + Q_D^2 + Q_{Ev}^1 + Q_{Ev}^2 - Q_{Cd}^1 - Q_{Cd}^2 + Q_{Tr}^1 + Q_{Cv}^i + Q_{Ev}^i - Q_{Cd}^i$$

Où les phénomènes de diffusion et de conduction gravitaire sont formulés par l'infiltration : équation 3.70 (selon l'approche NEUMAN liaison dynamique). La condensation, l'évaporation et la transpiration sont formulées par les équations 3.77, 3.76 et 3.75. Pour finir, la convection est explicitée par l'équation 3.71.

4.5 Synthèse de la représentation

4.5.1 Synthèse des phénomènes

Dans le but de faciliter la compréhension des approches associées à chacun des cas d'études, le tableau 4.1 propose une synthèse des phénomènes considérés pour chacun des champs. La

Table 4.1 – Synthèse des approches conceptuelles pour chacun des cas d'études : les phénomènes considérés.

ISOTEST 1 : Substrat				ISOTEST 3 : Tôle			
	T	Hyd	Hyg		T	Hyd	Hyg
CLint	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	/	/	CLint	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	/	/
Milieu A	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	/	/	Milieu A	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	/	/
CL A/B	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	/	/	CLext	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	/	/
Milieu B	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	/	/				
CLext	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	/	/				

ISOTEST 2 : PCV ^{T_{ce}} _{ce}				ISOTEST 4 : PCV ^{T_h} _{L_{so}}			
	T	Hyd	Hyg		T	Hyd	Hyg
CLint	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	$\dot{S}^i, \dot{C}^d, \dot{E}^i$	$Q_{St}^i, Q_{Ev}^i, Q_{Cd}^i$	CLint	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	$\dot{S}^i, \dot{C}^d, \dot{E}^i$	$Q_{St}^i, Q_{Ev}^i, Q_{Cd}^i$
Milieu A	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	/	/	Milieu A	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	/	/
CL A/C	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	$\dot{D}^c, \dot{C}^c, \dot{C}^d, \dot{E}^c, \dot{E}^i, \dot{R}^i$ $\dot{Q}^c, \dot{S}^c, \dot{C}^d, \dot{S}^i, \dot{R}^i$	$Q_{St}^c, Q_{Ev}^c, Q_{Cd}^c, Q_{Tr}^c, Q_{St}^i, Q_{Ev}^i, Q_{Cd}^i$	CL A/E	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	$\dot{D}^c, \dot{C}^c, \dot{S}^i, \dot{E}^i, \dot{C}^d, \dot{R}^i$	$Q_{St}^c, Q_{Ev}^c, Q_{Cd}^c, Q_{Tr}^c, Q_{St}^i, Q_{Ev}^i, Q_{Cd}^i$
Milieu C	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	$\dot{D}^c, \dot{C}^c, \dot{C}^d, \dot{E}^c, \dot{E}^i, \dot{R}^i$ $\dot{Q}^c, \dot{S}^c, \dot{C}^d, \dot{S}^i, \dot{R}^i$	$Q_{St}^c, Q_{Ev}^c, Q_{Cd}^c, Q_{Tr}^c, Q_{St}^i, Q_{Ev}^i, Q_{Cd}^i$	Milieu E	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	\dot{C}^e, \dot{S}^e	$Q_{St}^e, Q_{Cd}^e, Q_{Ad}^e$
CL C/D	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	$\dot{D}^c, \dot{C}^c, \dot{C}^d, \dot{E}^c, \dot{E}^i, \dot{R}^i$ $\dot{Q}^c, \dot{S}^c, \dot{C}^d, \dot{S}^i, \dot{R}^i$	$Q_{St}^c, Q_{Ev}^c, Q_{Cd}^c, Q_{Tr}^c, Q_{St}^i, Q_{Ev}^i, Q_{Cd}^i$	CL E/F	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	$\dot{S}^i, \dot{C}^e, \dot{C}^f, \dot{I}^t, \dot{E}^f, \dot{C}^d, \dot{f}$	$Q_{St}^f, Q_{Cd}^f, Q_{Tr}^f, Q_{Ev}^f, Q_{Cd}^i, Q_{St}^i$
Milieu D	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	\dot{C}^d, \dot{S}^d	$Q_{St}^d, Q_{Cd}^d, Q_{Tr}^d$	F feuille	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	$\dot{I}^t, \dot{E}^f, \dot{C}^d, \dot{f}, \dot{S}^f$	$Q_{St}^f, Q_{Cd}^f, Q_{Tr}^f, Q_{Ev}^f, Q_{Cd}^i, Q_{St}^i$
CLext	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	$\dot{S}^i, \dot{A}^i, \dot{I}^t, \dot{C}^d, \dot{C}^d, \dot{E}^d$	$Q_{St}^d, Q_{Cd}^d, Q_{Tr}^d, Q_{Ev}^d, Q_{Cd}^i, Q_{St}^i$	F air	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	\dot{C}^f, \dot{S}^f	$Q_{St}^f, Q_{Cd}^f, Q_{Tr}^f, Q_{Ev}^f, Q_{Cd}^i, Q_{St}^i$
				CLext	$\varphi_{Dt}^a, \varphi_{St}^a, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$ $\varphi_{Rd}^i, \varphi_{Cd}^i, \varphi_{Ev}^i$	$\dot{S}^i, \dot{A}^i, \dot{I}^t, \dot{C}^f, \dot{C}^d, \dot{f}, \dot{E}^f$	$Q_{St}^f, Q_{Cd}^f, Q_{Tr}^f, Q_{Ev}^f, Q_{Cd}^i, Q_{St}^i$

nomenclature des flux indiqués ainsi que leur représentation sont présentées dans les sections 3.2 et 3.3 pour les transferts thermiques et massiques, respectivement.

Où les exposants $\{i, a, b, c, d, e, f\}$ font respectivement référence à l'interface intercouche ainsi qu'aux différentes couches en présence. Par ailleurs, les conditions aux limites internes et externes sont de type NEUMAN, alors que les conditions aux limites associées aux nœuds de liaisons sont de type NEUMAN liaison dynamique.

4.5.2 Analogies thermo-hydro-hygro-électriques

Afin d'illustrer la prise en compte de chacun de ces transferts, les champs observés de chacun des cas d'études sont traduits, par analogie, en schémas électriques. Les analogies thermo-hydro-hydro-électriques développés sont explicitées par les figures 4.2 et 4.3.

L'approche utilisée reprend les analogies classiques : la résistance thermique, hydrique ou hygrique est représentée par une résistance électrique, le stockage par capacité et la source de flux par un générateur de courant. À noter que dans le cas de l'irrigation le générateur de courant est asservi à une minuterie.

Le caractère novateur de l'approche réside dans la considération du couplage des champs thermique, hydrique et hygrique, *i.e.* les phénomènes de changements de phases. Ceux-ci sont représentés par des générateurs de courant (production d'un flux de vapeur d'eau) dont la sortie affecte chacun des champs, si nécessaire, *via* des transformateurs rapport de mélange/température (W/T) ou rapport de mélange/teneur en eau liquide (W/ω). L'interconnexion des réseaux thermique, hydrique et hygrique ainsi établie induit l'usage de diodes. Enfin, le générateur de courant est connecté aux trois réseaux, ce qui lui permet de délivrer un signal qui est fonction des tensions observées ; cette connexion permet une boucle de contrôle rétroactive.

À noter que l'évaporation et la condensation sont représentées par le même générateur, dont le signe du flux délivré est fonction du caractère endothermique ou exothermique du changement de phase.

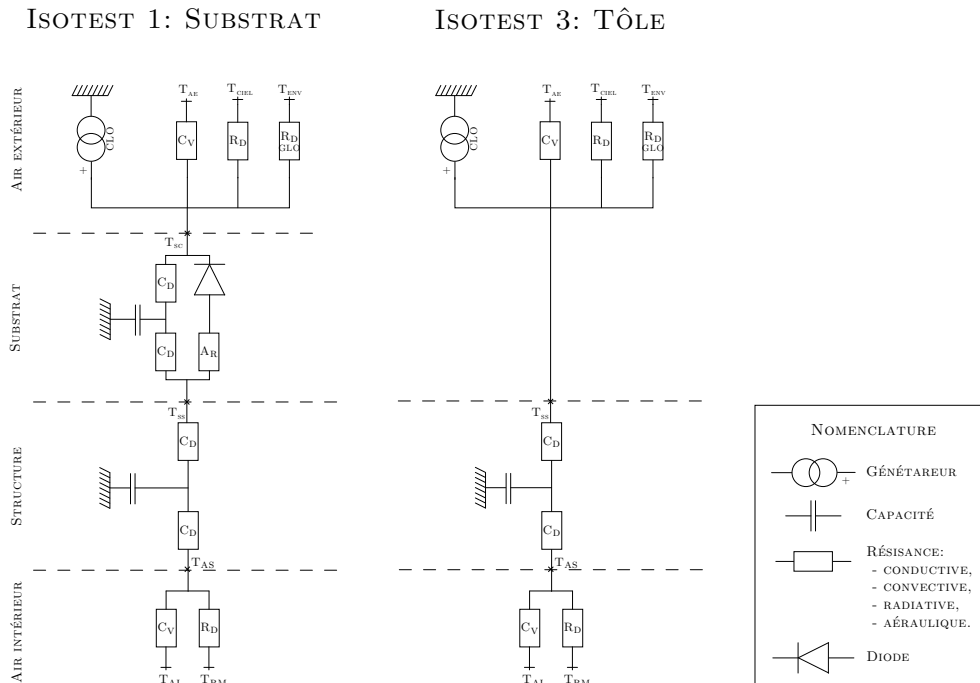


Figure 4.2 – Analogies thermo-électrique associées aux cas d'étude tôle et substrat.

ISOTEST 2: PCV_{CE}

ISOTEST 4: PCV_{LSA}

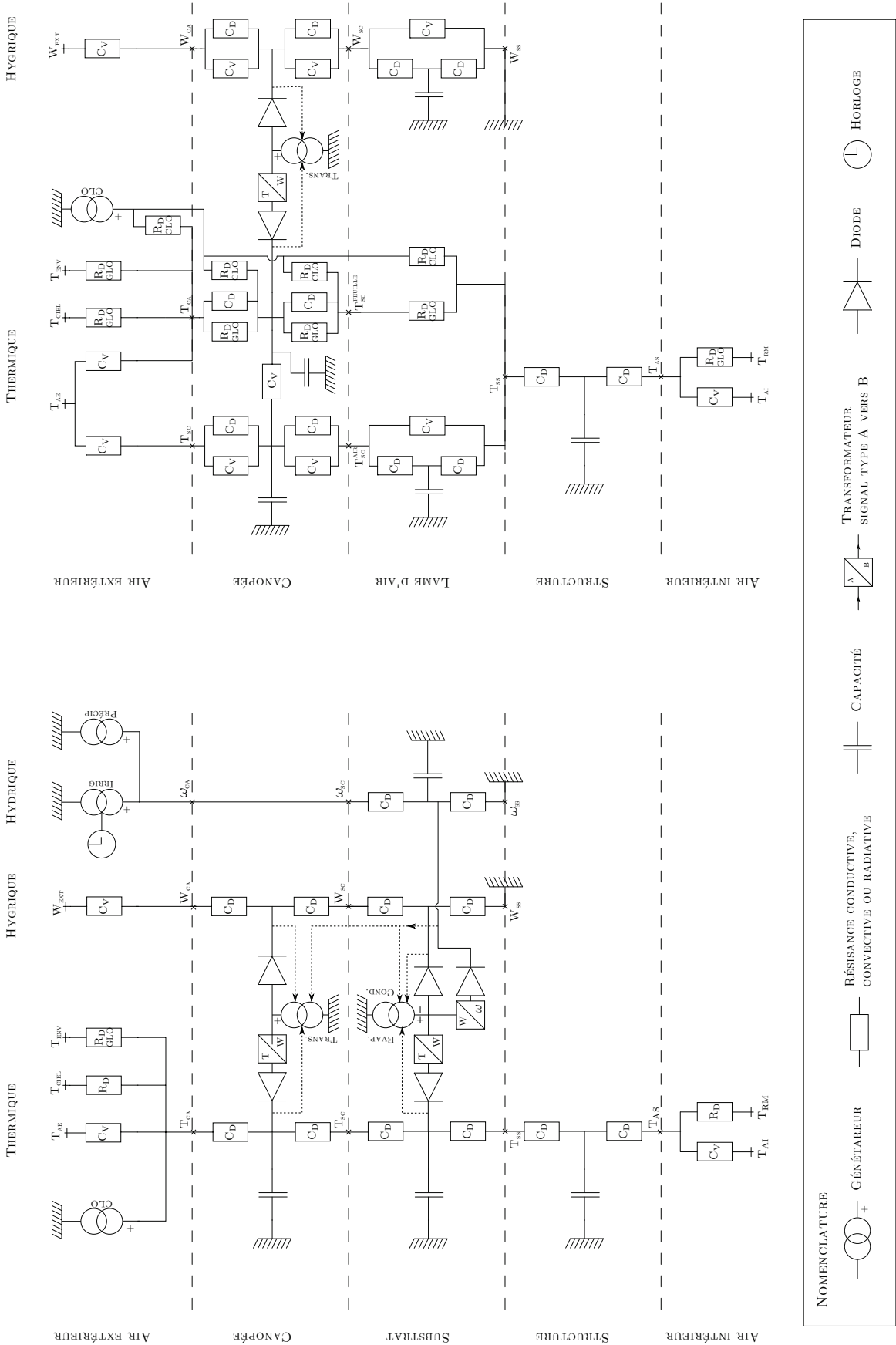


FIGURE 4.3 – Analogies thermo-hydro-hydro-électrique associées aux cas d'étude PCV_{CE}Th et PCV_{LSA}Th.

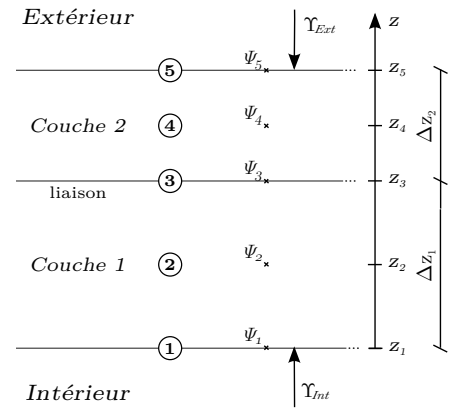
4.6 Système d'équation et numérisation

Par souci de lisibilité et généralisation, la grandeur associée au champ observé est notée Ψ , elle correspond au champ thermique, hydrique ou hygrique. La densité de flux perpendiculaire à la paroi est quant à elle notée Υ .

4.6.1 Le jeu d'équations différentielles

Il a été défini précédemment que les parois possèdent trois types de nœuds : internes, aux limites et de liaison, chacun ayant une équation associée. Dans le cas d'une paroi bicouche possédant trois nœuds par couche, le jeu d'équations associées est défini par le système d'équations différentielles 4.22, où $\{P_i, C_i, I_i\}$ représentent⁹ respectivement les termes de production, de conduction et d'inertie.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Psi(z_5, t)}{\partial t} = \frac{2C_2}{\Delta z_2 I_2} \frac{\partial \Psi(z_5, t)}{\partial z} + \frac{2(P_2 + \Upsilon_{ext})}{\Delta z_2 I_2} \\ \frac{\partial \Psi(z_4, t)}{\partial t} = \frac{C_2}{I_2} \frac{\partial^2 \Psi(z_4, t)}{\partial z^2} + \frac{P_2}{I_2} \\ \frac{\partial \Psi(z_3, t)}{\partial t} = \frac{C_2}{I_2} \frac{\partial^2 \Psi(z_3, t)}{\partial z^2} \Big|_2 + \frac{C_1}{I_1} \frac{\partial^2 \Psi(z_3, t)}{\partial z^2} \Big|_1 \\ \quad + \frac{P_2}{I_2} + \frac{P_1}{I_1} \\ \frac{\partial \Psi(z_2, t)}{\partial t} = \frac{C_1}{I_1} \frac{\partial^2 \Psi(z_2, t)}{\partial z^2} + \frac{P_1}{I_1} \\ \frac{\partial \Psi(z_1, t)}{\partial t} = \frac{2C_1}{\Delta z_1 I_1} \frac{\partial \Psi(z_1, t)}{\partial z} + \frac{2(P_1 + \Upsilon_{int})}{\Delta z_1 I_1} \end{array} \right. \quad (4.22)$$



Toutes les équations proviennent de bilans de flux (énergétique ou massique) sur une maille virtuelle. Dans le cas des équations aux limites interne et externe, ce bilan est effectué sur une demi-maille de volume $V' = 0,5V$, dont les flux entrants sont comptés positivement [INCROPERA et DEWITT, 1996].

Nota : Dans une approche nodale, la somme des flux¹⁰ internes (Υ_{int}) et externes (Υ_{ext}) permettent d'effectuer le couplage multi-échelle entre la paroi et la zone (Cf. section 1.2.1).

4.6.2 Discrétisation

Les équations choisies pour définir le système explicité précédemment sont de type analytique. Souhaitant résoudre celui-ci numériquement, il est alors nécessaire de procéder à la discrétisation de leurs dérivées partielles.

Dans une approche par différences finies, la discrétisation est issue de la formule de TAYLOR. La dérivée partielle temporelle est discrétisée selon un schéma aval du premier ordre. Les discrétisations des dérivées partielles spatiales sont de type implicite, les schémas utilisés sont les suivants : centré pour les dérivées du premier et second ordre dans les couches ; amont ou aval pour les dérivées du premier et second ordre aux interfaces.

9. Par exemple, pour le thermique $C_i = \lambda_i$ et $I_i = \rho_i c_{p,i}$.

10. Il s'agit par exemple des flux convectifs et radiatifs dans le cas du champ thermique.

Suite à l'application des schémas et réarrangement, il vient l'équation 4.23.

$$\begin{cases} \Psi_5^t = \left[1 + 2\frac{\Delta t}{\tau_2} \right] \Psi_5^{t+1} - 2\frac{\Delta t}{\tau_2} \Psi_4^{t+1} - 2\frac{\Delta t}{J_2} (P_2 + \Upsilon_{ext}) \\ \Psi_4^t = \left[1 + 2\frac{\Delta t}{\tau_2} \right] \Psi_4^{t+1} - \frac{\Delta t}{\tau_2} (\Psi_5^{t+1} + \Psi_3^{t+1}) - \frac{\Delta t}{J_2} P_2 \\ \Psi_3^t = \left[1 + 2\Delta t (\tau_1^{-1} + \tau_2^{-1}) \right] \Psi_3^{t+1} + \frac{\Delta t}{\tau_2} (\Psi_5^{t+1} - 2\Psi_4^{t+1}) + \frac{\Delta t}{\tau_1} (\Psi_1^{t+1} - 2\Psi_2^{t+1}) \\ \quad - \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{P_2}{J_2} + \frac{P_1}{J_1} \right) \\ \Psi_2^t = \left[1 + 2\frac{\Delta t}{\tau_1} \right] \Psi_2^{t+1} - \frac{\Delta t}{\tau_1} (\Psi_3^{t+1} + \Psi_1^{t+1}) - \frac{\Delta t}{J_1} P_1 \\ \Psi_1^t = \left[1 + 2\frac{\Delta t}{\tau_1} \right] \Psi_1^{t+1} - 2\frac{\Delta t}{\tau_1} \Psi_2^{t+1} - 2\frac{\Delta t}{J_1} (P_1 + \Upsilon_{int}) \end{cases} \quad (4.23)$$

4.6.3 Approche matricielle : le système d'état

L'équation 4.23 peut dès lors être mise sous forme matricielle (eq. 4.24).

$$[M_e] \cdot [\Psi]^{t+1} = [M_i] \cdot [\Psi]^t + [S] \quad (4.24)$$

Avec :

$$[M_e] \cdot [\Psi]^{t+1} = \begin{bmatrix} 1 + 2\frac{\Delta t}{\tau_2} & -2\frac{\Delta t}{\tau_2} & & & \\ -\frac{\Delta t}{\tau_2} & 1 + 2\frac{\Delta t}{\tau_2} & -\frac{\Delta t}{\tau_2} & & \\ \frac{\Delta t}{\tau_2} & -2\frac{\Delta t}{\tau_2} & 1 + \frac{\Delta t}{\tau_2} + \frac{\Delta t}{\tau_1} & -2\frac{\Delta t}{\tau_1} & \frac{\Delta t}{\tau_1} \\ & & -\frac{\Delta t}{\tau_1} & 1 + 2\frac{\Delta t}{\tau_1} & -\frac{\Delta t}{\tau_1} \\ & & & -2\frac{\Delta t}{\tau_1} & 1 + 2\frac{\Delta t}{\tau_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_5 \\ \Psi_4 \\ \Psi_3 \\ \Psi_2 \\ \Psi_1 \end{bmatrix}^{t+1} \quad (4.25)$$

$$[M_i] \cdot [\Psi]^t + [S] = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_5 \\ \Psi_4 \\ \Psi_3 \\ \Psi_2 \\ \Psi_1 \end{bmatrix}^t + \begin{bmatrix} -2\frac{\Delta t}{J_2} (P_2 + \Upsilon_{ext}) \\ -\frac{\Delta t}{J_2} P_2 \\ -\frac{\Delta t}{2} (P_2/J_2 + P_1/J_1) \\ -\frac{\Delta t}{J_1} P_1 \\ -2\frac{\Delta t}{J_1} (P_1 + \Upsilon_{int}) \end{bmatrix}$$

Où $J_i = I_i \Delta z_i^2$ et $\tau_i = \frac{J_i}{C_i}$.

Remarque : Bien que $[M_e]$ soit ici tridiagonale ce n'est pas toujours le cas. En effet, dans l'hypothèse¹¹ de l'observation de deux champs de températures unidimensionnels parallèles la symétrie disparaît. La modélisation des interactions entre ces nœuds (ex. : convection), associée à la concaténation des vecteurs, induit l'apparition de termes de couplages alignés parallèlement à la diagonale principale.

Enfin, le système d'état étant linéaire, il est nécessaire que tous les modèles utilisés le soient également (vis-à-vis de Ψ). Dans le cas de modèles complexes¹² à linéariser, une méthode consiste à considérer les variables Ψ^1 au pas de temps $t+1$, alors que les variables $\Psi^n, n \neq 1$ non linéaires sont considérées au pas de temps t ; dans le cas d'une erreur trop importante, une résolution itérative pour chacun pas de temps est alors nécessaire.

Nota : afin d'assurer la convergence il est préférable d'avoir un modèle linéarisé.

11. C'est notamment le cas des températures d'air et de feuille dans la canopée de l'ISOTEST 4.

12. C'est notamment le cas des équations de la diffusivité hydrique (eq. 3.3.2.1) et de la conductivité (eq. 3.3.2.1).

Section 5

Résolution et couplage

Les modèles physiques ayant été décrits et numérisés, la résolution par ISOLAB peut dès lors être opérée. Pour cela, le couplage des systèmes matriciels de PCVBÂT à ceux d'ISOLAB est présenté, puis la résolution est exposée. Enfin, le couplage connecté des solveurs thermiques, hydrique et hygrique induisant un risque de convergence vers un système oscillant (résolution itérative), l'algorithme de gestion est explicité.

5.1 Présentation du code de calcul Isolab

La plate-forme d'expérimentation numérique ISOLAB est un code de calcul thermo-hygro-aérodynamique simulant¹ le comportement énergétique des bâtiments. Développé sous l'environnement MATLAB il a été conceptualisé et implémenté par le Pr MIRANVILLE au sein du laboratoire PIMENT² [MIRANVILLE, 2002].

Modulaire, il permet une description zonale d'un bâtiment et de prédire son comportement thermique *via* une simulation numérique intégrant les conditions météorologiques de son lieu d'implantation. De manière générale, le synoptique de son fonctionnement peut être résumé par la figure 5.1.

Il a notamment été le support de plusieurs thèses, permettant la capitalisation de nouveaux modules associés aux parois complexes intégrant : des parois minces réfléchissantes [MIRANVILLE, 2002], des panneaux photovoltaïques [BIGOT, 2011], des matériaux à changement de phase [GUICHARD, 2013] (*etc.*); mais aussi des outils tels que l'analyse de sensibilité (méthode efast), l'optimisation paramétrique (couplage avec GenOpt), l'assimilation de données, ainsi que le tracé des diagrammes de confort (entre autres).

Fort de ce support de recherche très complet et de ses outils associés, il a dès lors été possible de développer des fonctionnalités spécifiques, nécessaires aux travaux de thèse. Implémentées sous forme de modules, afin de capitaliser sans perturber le fonctionnement existant, ces fonctionnalités permettent d'apporter une petite contribution à l'édifice de référence qu'est ISOLAB.

Parmi ces modules, en plus de PCVBÂT, on peut notamment citer le module d'obtention de

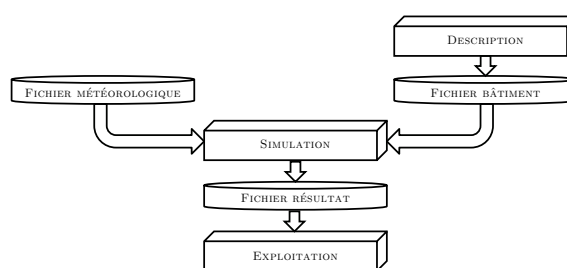


Figure 5.1 – Synoptique fonctionnel d'ISOLAB.

1. Le lecteur désireux de connaître les hypothèses inhérentes à la modélisation d'ISOLAB, ou tout autre complément est prié de se référer à [MIRANVILLE, 2002].

2. Plus exactement LPBS, faisant maintenant partie intégrante du laboratoire PIMENT.

la variation temporelle optimale d'un paramètre, en vue d'apporter une aide à la définition du modèle physique associé ; mais aussi le module de gestion de l'export automatisé d'ISOLAB :

- création d'archive compressée (selon deux modes : voué à la diffusion ou à la sauvegarde),
- création d'exécutables intégrant l'interface graphique ou spécifiquement dédiés au couplage avec GENOPT.

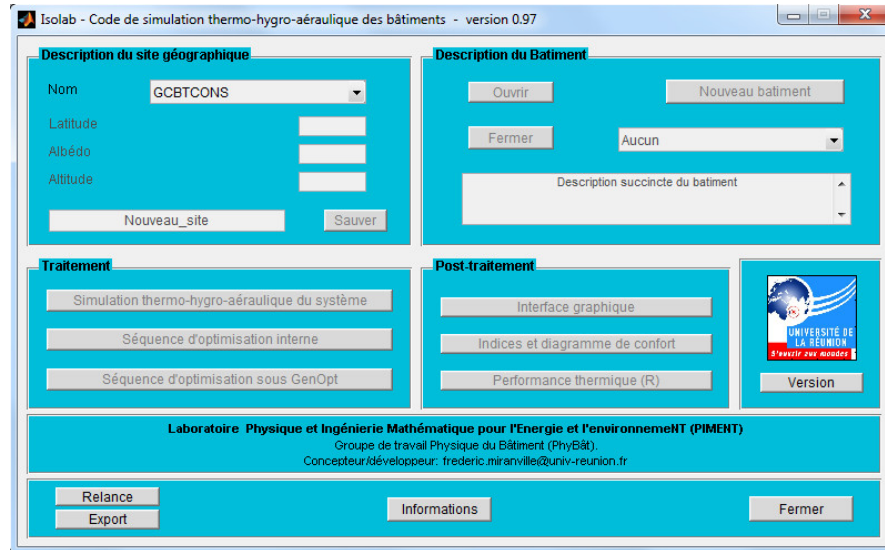


Figure 5.2 – Interface d'accueil d'ISOLAB intégrant les modules développés.

5.2 Couplage des systèmes matriciels

Remarque : Les systèmes matriciels en présence, qu'ils soient thermiques, hydriques ou hygriques possèdent tous le même formalisme. En vue de simplifier la lecture, le couplage est explicité de manière générique, faisant ressortir localement les spécificités inhérentes aux variables d'état observées.

La stratégie de modélisation d'ISOLAB est basée sur la résolution d'un système linéaire inverse, discrétisé *via* la méthode des différences finies implicites associée à un schéma aval d'ordre 1 en temps et un schéma centré d'ordre 2 en espace (eq. 5.1). Le système matriciel obtenu est alors composé de quatre tenseurs :

- le vecteur d'état : $[\Psi]$, de dimension $[n,1]$, au pas de temps t ou $t+1$;
- la matrice d'évolution $[M_e]$, de dimension $[n,n]$, associé au pas de temps $t+1$;
- la matrice instantanée $[M_i]$, de dimension $[n,n]$, associé au pas de temps t ;
- le vecteur des sollicitations : $[S]$, de dimension $[n,1]$.

$$[M_e] \cdot [\Psi]^{t+1} = [M_i] \cdot [\Psi]^t + [S] \quad (5.1)$$

La stratégie de modélisation de PcvBât exploitant la même approche en vue de faciliter le couplage, celui-ci consiste alors en deux étapes :

1. Concaténer les systèmes matriciels ;
2. Affecter les termes dits « de couplage » [BIGOT, 2011].

À noter que le couplage des systèmes matriciels entre PcvBât et ISOLAB nécessite une attention particulière : cette étape doit respecter des conditions³ strictes d'un point de vue numérique

3. Ces conditions ne sont pas développées ici, pour plus d'information se référer à un cours d'analyse numérique.

(conditionnement ⁴ matriciel) et physique (homogénéité ⁵, validité ⁶ des grandeurs d'état connectées).

5.2.1 Concaténation des systèmes matriciels

Durant l'étape de concaténation il s'agit simplement d'ajouter les matrices issues de PCVBÂT à la suite de celles créées par ISOLAB. Plus exactement, si n PCV sont définies, il s'agit d'ajouter tous les systèmes, notés de $[M_e]_1^{\text{PCV}}$ à $[M_e]_n^{\text{PCV}}$, aux m systèmes déjà présents. Ces derniers définissant les parois de la zone considérée, ainsi que les éventuels vitrages et autres parois complexes composées de panneaux photovoltaïques ou de matériaux à changement de phase.

$$[M_e] = \begin{bmatrix} [M_e]_1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & [M_e]_m & & & \\ [C'']_1 & \cdots & [C'']_m & [C_e] & & \\ [R'']_1 & \cdots & [R'']_m & [R_e] & & \\ & & & [C']_1^{\text{PCV}} & [R']_1^{\text{PCV}} & [M_e]_1^{\text{PCV}} \\ & & & \vdots & \vdots & \ddots \\ & & & [C']_n^{\text{PCV}} & [R']_n^{\text{PCV}} & [M_e]_n^{\text{PCV}} \end{bmatrix} \quad [\Psi] = \begin{bmatrix} [\Psi]_1 \\ \vdots \\ [\Psi]_m \\ [\Psi_c] \\ [\Psi_r] \\ [\Psi]_1^{\text{PCV}} \\ \vdots \\ [\Psi]_n^{\text{PCV}} \end{bmatrix}$$

$$[M_i] = \begin{bmatrix} [M_i]_1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & [M_i]_m & & & \\ & & & [C_i] & & \\ & & & & [R_i] & \\ & & & & & [M_i]_1^{\text{PCV}} \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & [M_i]_n^{\text{PCV}} \end{bmatrix} \quad [S] = \begin{bmatrix} [S]_1 \\ \vdots \\ [S]_m \\ [0] \\ [0] \\ [S]_1^{\text{PCV}} \\ \vdots \\ [S]_n^{\text{PCV}} \end{bmatrix}$$

Où les termes C et R représentent les termes de couplages convectifs et radiatifs, entre la face interne des parois de la zone considérée et les températures d'air interne et radiante moyenne, respectivement.

5.2.2 Affectation des termes de couplage

Une fois les tenseurs concaténés, il est nécessaire d'affecter les termes de couplages. Ceux-ci sont différents selon le système associé au vecteur d'état $[\Psi]$ considéré.

— *Thermique* —

Les échanges entre la face interne des parois et la zone considérée se font par convection et rayonnement. Ceux-ci sont respectivement définis par les termes de couplages C et R présents dans la description précédente. Ils se rapportent aux températures d'air interne Ψ_c et radiante moyenne Ψ_r , respectivement.

La considération la paroi interne ⁷ de la PCV dans le bilan radiatif est réalisée par le bilan suivant, où Ψ_r est la température radiante moyenne, Ψ_j^{PCV} les températures de face interne des

4. Le conditionnement matriciel est implémenté sous MATLAB, il est accessible *via* la commande `cond`.

5. Les systèmes matriciels concaténés doivent être de même nature, *i.e.* : relatif à la même grandeur d'état exprimée dans la même unité.

6. Une erreur de ligne ou de colonne lors de l'affectation dans le système matriciel est une bétise classique.

7. *Nota* : dans les couplages présentés, la paroi représentée par la PCV (de surface S_j^{PCV}) est déjà définie dans le bilan initial *via* l'une des S_i . S_j^{PCV} remplace donc S_i au prorata de la surface occupée par la PCV. Si la PCV remplace totalement la paroi initiale ($S_j^{\text{PCV}} = S_i$), alors cette dernière est considérée comme une paroi « fantôme » (les couplages sont annulés).

PCV et V_i les températures de face interne des autres parois.

$$\Psi_r = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - S_i^{\text{pcv}}) \Psi_i + \sum_{j=1}^m S_j^{\text{pcv}} \Psi_j^{\text{pcv}}}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (5.2)$$

Pour la convection il faut également modifier l'équation de bilan associée, cette fois entre la température de paroi⁷ et le nœud d'air de la zone [MIRANVILLE, 2002]. Le couplage est fait par pondération de la considération du coefficient d'échange convectif (h_{cv}) en surface de la PCV. Il est présenté par l'équation 5.3, où Ψ_c est la température d'air de la zone.

$$m_{air} c_{p,air} \frac{\partial \Psi_c}{\partial t} = \sum_{i=1}^n h_{cv,i} (S_i - S_i^{\text{pcv}}) (\Psi_i - \Psi_c) + \sum_{j=1}^m h_{cv,j} S_j^{\text{pcv}} (\Psi_j^{\text{pcv}} - \Psi_c) \quad (5.3)$$

— Hydrique —

Il n'y a pas d'échange direct avec la zone pour ce qui est de l'eau liquide. Cette dernière est supposée rester à la surface de la paroi décrite et s'évaporer (pas de déplacement de cette eau). *Nota* : cette hypothèse suppose que les forces gravitaires soient plus faibles que les forces capillaires et de KNUDSEN⁸. Les termes « C » et « R » précédemment définis sont donc absents du système matriciel hydrique.

— Hygrique —

Les échanges à l'interface de la PCV et de la zone sont considérés *via* un coefficient d'échange hygrique basé sur les rapports de mélanges à la surface de la paroi et dans l'air de la zone. Les termes « R » précédemment définis sont absents du système matriciel hygrique.

5.2.3 Validation du couplage

Il est à noter que l'implémentation du modèle et des couplages entre ISOLAB et PCVBÂT ont fait l'objet d'une validation logicielle pour le cas de la simulation d'une paroi traditionnelle. C'est-à-dire une paroi continue, homogène et uniforme soumise aux sollicitations internes (convection et irradiation GLO), et externes (convection et irradiation GLO+CLO). La confrontation des résultats obtenus par ISOLAB (logiciel validé expérimentalement et suivant la procédure BesTest) et par PCVBÂT ont permis corroborer les résultats à la précision machine près ($\epsilon_{ps} = 2 \cdot 10^{-15}$).

5.3 Méthodes de résolution sous Isolab

5.3.1 Les algorithmes de résolution

Deux modes de résolution⁹ sont accessibles sous ISOLAB : les types « connectés », et « multi-connectés ». Leurs différences résident dans l'approche utilisée pour la résolution des systèmes (appel aux solveurs). Dans le mode connecté, pour un pas de temps donné, le système thermique est résolu itérativement jusqu'à convergence, puis c'est au tour des systèmes hygrique et hydrique. Dans le mode multi-connecté, à chaque itération les trois systèmes sont résolus, assurant leurs interactions.

Les algorithmes associés sont présentés par la figure 5.3. Pour une revue détaillée des stratégies de couplage, se référer à [SMITH-SCHNEIDER, 1994] et [WOLOSYN, 1999].

Créé spécifiquement pour les besoins de la thèse, l'approche multi-connectée est particulièrement adaptée aux modèles de PCV. Ce mode est notamment nécessaire pour considérer la

8. Force apparaissant à l'interface de deux surfaces possédant un gradient de température et distantes de l'ordre de 70 nm aux conditions normales de température et de pression.

9. Sur trois, la résolution « directe » (toutes les zones sont représentées par un unique système d'état) n'est pas présentée, car l'hydrique et hygrique n'y sont pas implémentés.

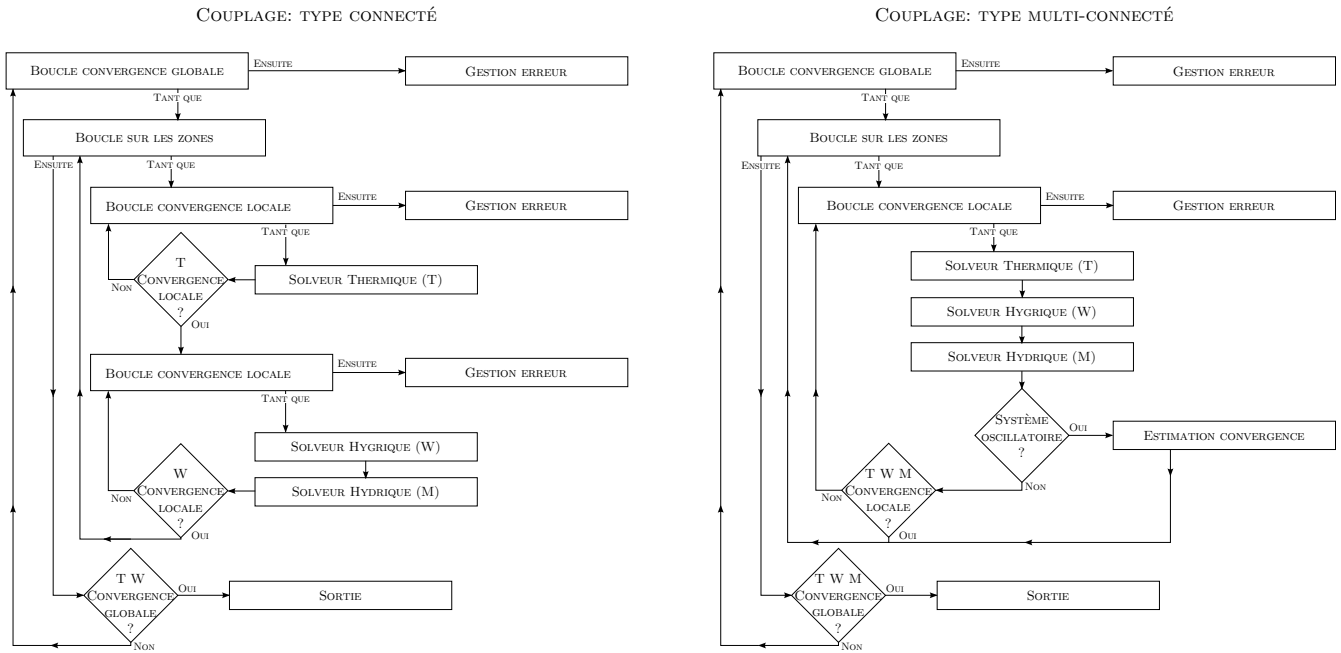


Figure 5.3 – Algorithmes de résolution sous ISOLAB.

rétroaction de l'impact des phénomènes de changement de phase (évaporation, mais aussi transpiration, *etc.*) sur les champs thermique, hydrique et hygrique.

Remarque : selon les modèles utilisés la résolution peut converger vers un système oscillatoire¹⁰ en régime permanent. En vue de corriger cet écueil, ces systèmes sont détectés et l'estimation de la convergence est opérée (*Cf* section 5.4). À noter que cette approche peut aussi permettre de réduire le temps de calcul si celle-ci est étendue aux régimes oscillants convergeant.

5.3.2 Les solveurs

Appelés à chaque pas de temps durant les procédures de résolutions explicitées précédemment, les solveurs permettent de créer et de résoudre les systèmes matriciels (fig. 5.4). C'est durant leurs utilisations que les modèles de PCV sont interprétés ; les systèmes d'équations associés sont alors créés puis couplés à ceux d'ISOLAB, et enfin résolus.

Dans un souci de lecture, les trois systèmes d'équations possédant la même forme (eq. 5.4), leur résolution est présentée de manière générique par l'équation 5.5.

$$[M_e] \cdot [\Psi]^{t+1} = [M_i] \cdot [\Psi]^t + [S] \quad (5.4)$$

$$[\Psi]^{t+1} = [M_e]^{-1} \cdot ([M_i] \cdot [\Psi]^t + [S]) \quad (5.5)$$

Considérant le temps de calcul et la précision numérique, la solution est obtenue *via* une factorisation QR avec pivot (il n'y a pas d'inversion¹¹ complète de $[M_e]$). Cette approche, recommandée pour la résolution matricielle d'un système inverse sous MATLAB, est opérée par la commande « \ ».

À noter que cette commande fait appel aux routines LAPACK [ANDERSON et al., 1999] si $[M_e]$ est une matrice « pleine », alors que si $[M_e]$ est de type « sparses¹² » un algorithme dédié, basé sur la factorisation QR, est utilisé.

10. Ce phénomène apparaît également pour le couplage connecté des solveurs hydrique et hygrique, mais avec une intensité plus faible. *Nota* : dans ce cas, l'apparition du système oscillatoire est dû au front de condensation associé à la température de rosée.

11. L'inversion d'une matrice est faite *via* la commande « inv() » sous MATLAB

12. Matrice dont seules les valeurs non nulles sont stockées en mémoire, source d'un gain en ressource et en temps de calcul.

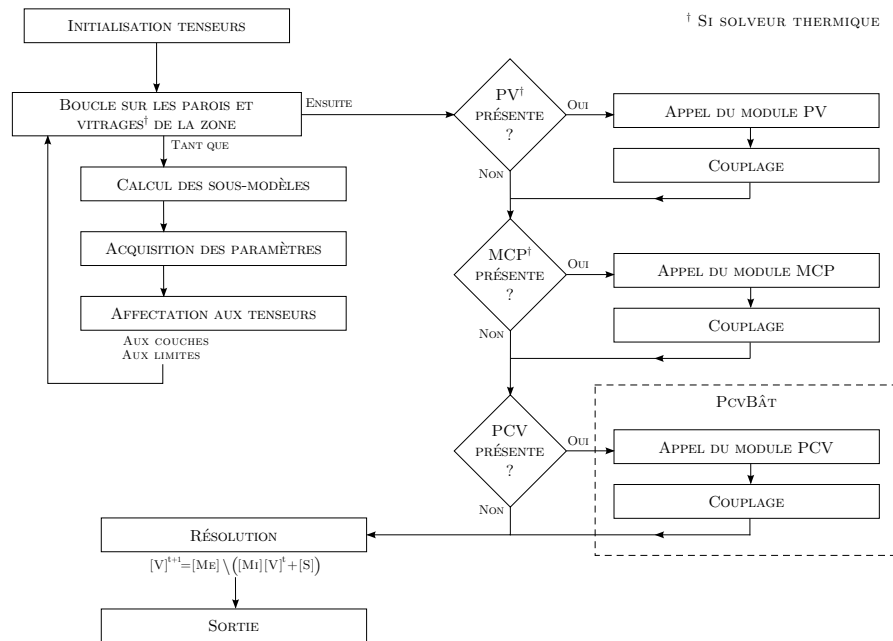


Figure 5.4 – Algorithme associé aux solveurs sous ISOLAB.

5.4 Gestion des systèmes oscillants

5.4.1 Contexte

Le couplage des systèmes thermique, hydrique et hygrique induit une boucle itérative afin d'assurer la convergence¹³. Or, pour un pas de temps donné, les résolutions successives d'un ensemble de système d'état peuvent converger rapidement vers un état stable (cas idéal) ou bien osciller vers celui-ci (cas général). Mais il arrive souvent que l'oscillation se stabilise périodiquement autour de n états stables, le système est alors en régime oscillatoire permanent n -stable. Cet état induit le non-respect du critère de convergence et dès lors l'échec de la résolution. *Nota* : un régime oscillatoire possédant une convergence trop lente provoque le même écueil.

Afin de permettre la convergence, un module détectant les systèmes oscillants a été développé. Il estime le cas échéant les convergences associées aux régimes permanent et convergent. Optionnel, celui-ci est défini en amont de la simulation dans ISOLAB (lors du choix du type de résolution souhaité).

5.4.2 Approche

Les résolutions successives permettent d'obtenir¹⁴ une suite de valeurs traduisant l'évolution de la convergence. Dans une approche de traitement du signal, il est possible de caractériser cette évolution par les trois notions suivantes :

La période : Schéma récurrent défini par les valeurs (Ψ) de la grandeur d'état observée (T, W, ou ω). La récurrence minimale (P) est explicitement définie (ici P=3, Cf. section 5.4.5).

La fréquence : Nombre de points (donc de résolutions) définissant la période.

Le type d'oscillation : Défini par la forme de la gaine autour des valeurs extrêmes de la grandeur d'état considérée. Il existe trois types : convergent, divergent et permanent, chacun d'eux pouvant être qualifié de symétrique (ou non) par rapport à leur valeur moyenne.

13. La valeur du critère de convergence est alors donnée par l'utilisateur.

14. Pour un même nœud et un même pas de temps.

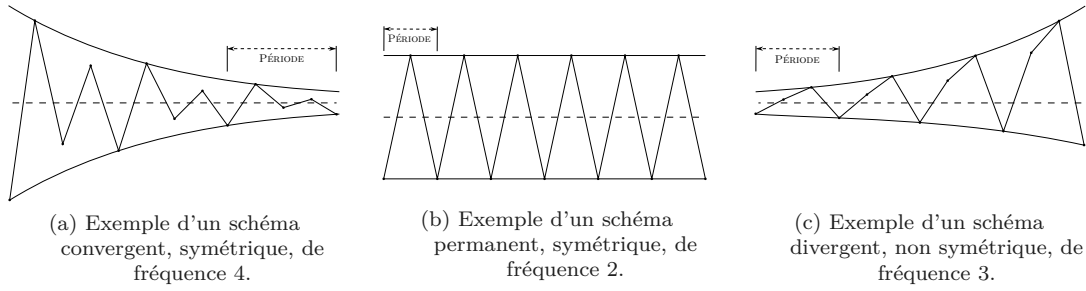


Figure 5.5 – Synthèse des notions utilisées pour la gestion des systèmes oscillants

5.4.3 Algorithme

L'obtention des périodes est basée sur le signe de la pente entre chacune des valeurs obtenues pour une même grandeur, suite aux résolutions successives pour un même pas de temps. À partir de celles-ci un schéma est recherché, définissant une période présente¹⁵ *a minima* P fois. Si plusieurs périodes sont présentes, la période possédant la plus grande constance (évolution des valeurs moyennes) et la fréquence la plus faible est sélectionnée. Ensuite la position des extrêmes (maximum et minimum) dans la période est obtenue, ainsi que leurs valeurs. L'erreur à la moyenne des valeurs minima et maxima alors est calculée; elle permet de définir le type d'oscillation : permanente (erreur inférieure au critère indiqué, ici 10^{-3}), convergente ou divergente. La figure 5.6 présente l'algorithme associé à cette approche.

Nota : Dans cette approche la notion de symétrie n'est pas considérée, *i.e.* les valeurs sont supposées réparties de manière homogène autour de la gaine¹⁶.

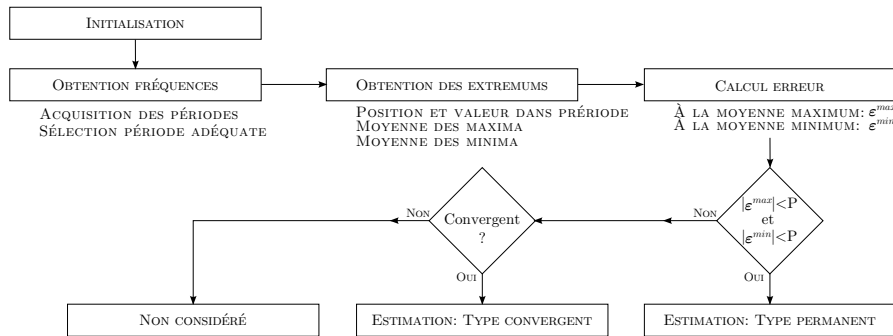


Figure 5.6 – Algorithme associé au module de la gestion des oscillations.

5.4.4 Estimation de la convergence

La solution souhaitée est la valeur moyenne autour de laquelle évoluent les oscillations (convergent ou non). L'estimation est différenciée en fonction du type d'oscillation trouvée.

— *Permanent* —

La solution estimée ($\tilde{\Psi}_p$) est obtenue *via* la moyenne des valeurs extrêmes de la dernière période : Ψ_{p1}^{min} et Ψ_{p1}^{max} .

$$\tilde{\Psi} = \frac{\Psi_{p1}^{min} + \Psi_{p1}^{max}}{2} \quad (5.6)$$

— *Convergent* —

15. La recherche des périodes est effectuée à partir des dernières valeurs itératives obtenues.

16. Ce développement n'a pas été nécessaire durant notre étude, car la précision obtenue était suffisante pour les simulations effectuées. Toutefois, cet aspect devra être traité afin de pouvoir considérer tous les cas de figures.

La solution souhaitée ($\tilde{\Psi}_c$) est estimée *via* les valeurs des extremums. Les valeurs des extremums évoluant, il est nécessaire de comparer des valeurs minimum et maximum ayant subi le même nombre de résolutions. Pour ce faire, un extremum (disons minimum) est sélectionné et les extrémums en amont et en aval (donc maxima) sont pondérés. Ensuite la moyenne arithmétique peut être effectuée.

L'extremum sélectionné est toujours l'avant-dernier extremum (N-1) présent dans les valeurs. Ainsi, les extrémums pondérés sont toujours positionnés en N-2 et N (soit l'antépénultième et le dernier) ; il sont nécessairement de même type, minimum ou maximum.

Il est alors nécessaire de distinguer deux cas pour calculer la moyenne : soit le dernier extremum est minimum (eq. 5.7), soit il est maximum (eq. 5.8).

$$\tilde{\Psi}_c^- = \frac{\Psi_{p_1}^{max} + \Psi_{p_1}^{min} + \frac{N_r}{F} (\Psi_{p_2}^{min} - \Psi_{p_1}^{min})}{2} \quad (5.7)$$

$$\tilde{\Psi}_c^+ = \frac{\Psi_{p_1}^{min} + \Psi_{p_1}^{max} + \frac{N_r}{F} (\Psi_{p_2}^{max} - \Psi_{p_1}^{max})}{2} \quad (5.8)$$

Où $\{p_1, p_2\}$ font respectivement référence aux dernières et avant-dernières périodes (numérotation depuis la fin). Avec F la fréquence et N_r correspond au nombre de résolution entre $\Psi_{p_1}^{max}$ et $\Psi_{p_2}^{max}$.

5.4.5 Vérification et impact

L'une des vérifications de la convergence est effectuée *via* une simulation sur deux jours d'un cas d'étude dont les régimes oscillatoires sont uniquement de type convergent¹⁷ et possèdent une faible célérité ($\Delta T = 15$ min).

Dans ce contexte, la vérification considérée est faite par comparaison des résultats issus de la résolution avec et sans activation du module de gestion des oscillations. Le nombre de périodes minimales (P) est également étudié. Suite à la simulation, il apparaît que pour P=3 l'erreur maximale induite sur la température est de 10^{-2} °C, soit nettement plus faible que l'erreur capteur : $\pm 0,5$ °C (tab. 5.2). De plus, le temps de calcul associé est diminué de 69% (tab. 5.2).

Nota : le nombre de périodes minimales est pris à 3 afin de limiter les risques de propagation d'erreur lors de simulation possédant une durée plus importante.

Table 5.1 – Valeurs des erreurs maxima observées inhérente à la gestion des oscillations

Nombre de période minimale (P)	Erreur de température [°C]
2	0,04
3	0,01

Table 5.2 – Temps de convergence inhérent à la gestion des oscillations

Estimation	Nombre de période minimale (P)	Temps [sec]	Gain [%]
Inactive	/	270	/
Active	2	58	78,52
Active	3	83	69,26

17. pas de régime oscillatoire permanent (ou divergent), car comparaison impossible sinon, puisque dès lors la résolution ne peut pas être achevée.

Section 6

Le code PcvBât

6.1 Stratégie

— Contexte —

Dans le cadre de cette thèse, d'un point de vue numérique, l'objectif est de pouvoir simuler le comportement thermique d'une PCV *via* un modèle de type semi-détaillé. Pour ce faire, le code de calcul créé (PcvBât) est couplé à ISOLAB, permettant ainsi la modélisation d'un bâtiment complet ainsi que l'usage des outils déjà développés (prédiction du confort, analyse de sensibilité, *etc.*).

— Description globale —

Générique et modulaire, PcvBât permet de modéliser toutes les configurations de PCV présentées. Pour ce faire, chacune des couches est décrite spécifiquement par ses caractéristiques géométriques et physiques. Le choix explicite de chacun des modèles utilisés, pour chacun des phénomènes physiques de chacune des couches, en fait un code multi-modèle. À noter que PcvBât, intégré à ISOLAB, est un module autonome faisant partie d'un code de calcul plus vaste dédié aux PCV. Afin de faciliter cette intégration (entre autres), PcvBât est codé en langage MATLAB. L'utilisation d'un langage interprété a permis de développer une approche nouvelle, complémentaire, au sein de l'équipe de recherche : la génération de fichiers de modèle.

— Générateur de modèle —

PcvBât permet de générer les fichiers de modèles nécessaires à la simulation. Cette approche consiste à générer en amont de la simulation un fichier contenant exactement le modèle adapté à la modélisation souhaitée. Ainsi, seul le code nécessaire est interprété, limitant les instructions conditionnelles et augmentant par conséquent la vitesse d'exécution. La création est basée sur l'analyse des choix de l'utilisateur lors de la description de la paroi et des phénomènes modélisés. La création d'un « fichier de modèle » possède entre autres les avantages suivants :

- 1 Le code réellement exécuté est aisément vérifié : pas de risque d'erreur dans les boucles conditionnelles ;
- 2 Le fichier texte permet d'augmenter la capacité d'intervention dans le code, lors de tests, modifications, *etc.* ;

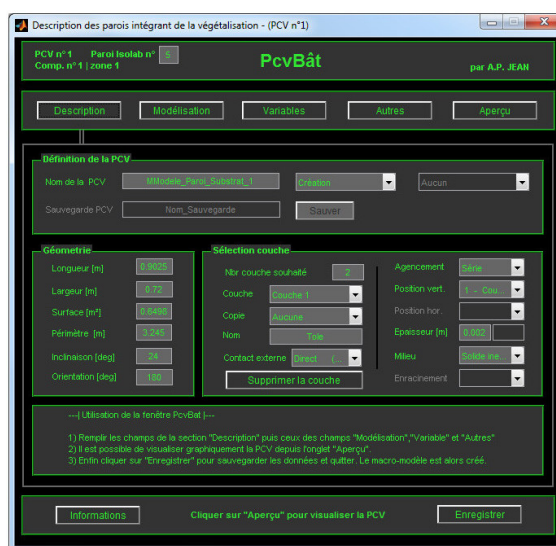


Figure 6.1 – Interface de PcvBât.

- 3 Le « débogage » est simplifié : code plus synthétique (digeste) et accès direct à l'environnement incriminé *via* la console (connaissance de l'état exact du système au moment du bug) ;
- 5 Il est possible de sauvegarder le modèle utilisé (pour archivage ou vérification ultérieure, *etc.*) ;
- 4 La génération automatique du fichier permet de limiter¹ les erreurs issues des développements temporaires issus du test du modèle ;
- 6 Il facilite l'extraction du modèle en vue d'une intégration à un outil d'aide à la décision (version simplifiée de PCVBAT).

Une description plus précise des choix et méthodes utilisées lors de la conception de PCVBÂT est présentée dans l'annexe G.

6.2 Couplage avec Isolab

Concernant le couplage, l'appel du générateur de modèle « PCVBÂT » par ISOLAB, se fait *via* l'interface de ce dernier. Il permet ainsi la définition de la PCV souhaitée. Suite à celle-ci, les fichiers de modèles sont créés et une fonction d'appel est générée automatiquement. Interprété à chaque pas de temps, le modèle génère et stocke dans une structure les tenseurs composant le système matriciel de la PCV. Ils sont alors récupérés par ISOLAB et couplés aux systèmes d'états thermique, hydrique et hygrique en vue de la résolution.

L'intégration de PCVBÂT à ISOLAB se fait donc à deux niveaux : (1) durant la description du bâtiment (donc de la PCV), *via* l'interface présentée précédemment, lorsque les choix de conception, de modélisation et les paramètres doivent être indiqués ; (2) à chaque pas de temps de la résolution, pour chacun des solveurs activés : thermique, hydrique et/ou hygrique (*Cf.* figures 5.3 et 5.4). Cette interaction directe apparaît lorsque le fichier d'appel générique des fichiers de modèle est interprété (*Cf.* figure G.3).

La représentation proposée par la figure 6.2 permet de visualiser ces liens entre ISOLAB et PCVBÂT.

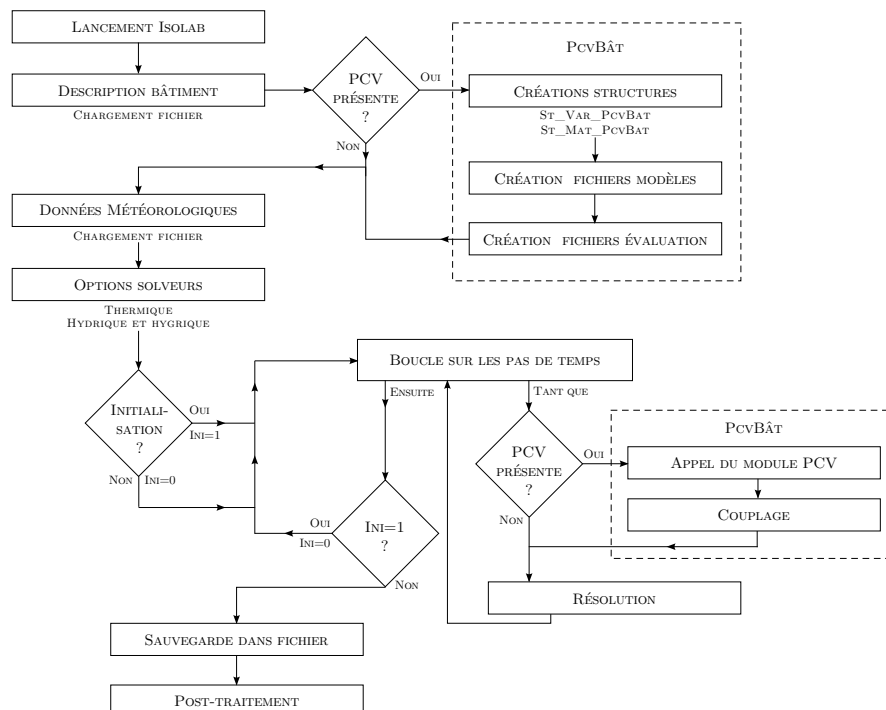


Figure 6.2 – Algorithme de simulation d'ISOLAB intégrant PCVBÂT.

1. La génération automatique permet de créer le modèle souhaité "vierge" de toute modification.

Section 7

Simulations

L'objet de cette section est de présenter les résultats issus de la simulation afin de vérifier que leurs cinétiques traduisent bien les phénomènes physiques en présence. Dès lors, des perspectives d'études pourront être définies, *i.e.* nécessité d'une étape d'optimisation paramétrique, d'affinage d'un modèle, *etc.*

Pour ce faire, les modèles obtenus pour chacun des quatre cas d'études indiqués sont mis en œuvre, puis les simulations et leurs résultats sont présentés. Enfin, des éléments de validation expérimentale sont abordés.

7.1 Procédure de vérification

— Mode opératoire —

Suite à la conception du module PCVBÂT et à son couplage avec ISOLAB, il est nécessaire de vérifier le bon fonctionnement du système ainsi obtenu. Pour ce faire, une vérification logicielle est opérée.

La procédure consiste, pour un fichier météo donné, à simuler un bâtiment (bizone) avec ISOLAB dans un premier temps. Puis le module PCVBÂT est activé¹ afin de modéliser la toiture², le reste de la description étant conservé (donc modélisé *via* ISOLAB). Les résultats de la simulation issus de ces deux approches sont ensuite confrontés. Il s'agit des températures (*Cf.* figure 7.1) ainsi que des tenseurs générés (donc $[M_e]$, $[M_i]$ et $[S]$). Il est impératif que pour chacun de ces indicateurs les résidus soient nuls. Étant donné que l'approche utilisée pour la modélisation est identique, que les paramètres utilisés sont identiques et que les sollicitations externes sont identiques (même modélisation) l'erreur autorisée est donc l'erreur associée à la précision machine (soit $2,22 \cdot 10^{-16}$ sur l'ordinateur utilisé).

— Le cas d'étude —

Pour la vérification, le cas d'étude porte naturellement sur un module ISOTEST situé sur plateforme expérimentale de l'IUT de Saint-Pierre de La Réunion. Afin de tester l'implémentation et le couplage de PCVBÂT, la cellule ISOTEST choisie est la configuration de référence : toiture tôle (fig.7.1). La composition exacte de l'ISOTEST est présentée par la section 1.3.2 du chapitre III.

1. Le module PCVBÂT permet de modéliser toute paroi multicouche (qu'elles soient en séries ou en parallèles) dont le cas spécifique de la végétation. De ce fait, elle peut modéliser une toiture composée d'une unique tôle d'acier.

2. L'échange de modélisation concerne le toit, car à composition équivalente, c'est la paroi possédant le transfert thermique le plus important. Il s'agit donc de la paroi la plus à même de permettre de déceler une éventuelle erreur de modélisation.

La figure 7.1 en présente la structure.

— Les résultats —

L'analyse des données issues des deux simulations est basée sur deux types d'indicateurs : les températures et les tenseurs générés ($[M_e]$, $[M_i]$ et $[S]$). Concernant les températures, les résidus obtenus sont tous inférieurs ou égaux à la précision machine, qu'il s'agisse des valeurs associées à la toiture ou aux enceintes (fig. 7.1). Le tracé par la figure 7.2 de la température sous la tôle illustre ces résultats.

Pour ce qui est des tenseurs, la paroi associée à PCVBÂT est concaténée au système d'ISOLAB. Une étape de mise en forme des tenseurs en amont du calcul des résidus est alors nécessaire. La description de la toiture initiale étant remplacée par celle de PCVBÂT, les champs associés à la description d'ISOLAB sont remplacés par ceux décrits par PCVBÂT afin de permettre une comparaison terme à terme des tenseurs (dans la limite de la dimension de ceux d'ISOLAB). Ce préalable effectué, les résidus peuvent être calculés : ils s'avèrent être tous inférieurs ou égaux à la précision machine.

Tous les indicateurs étant inférieurs ou égaux à la précision souhaitée, la vérification est alors validée.

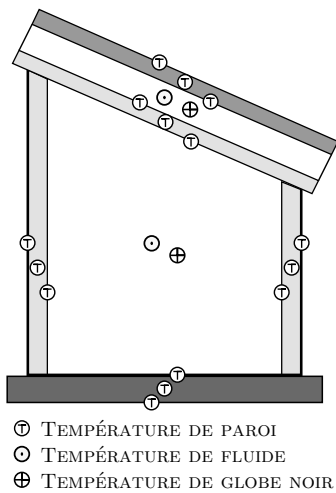


Figure 7.2 – Température sous la tôle simulée par ISOLAB et PCVBÂT.

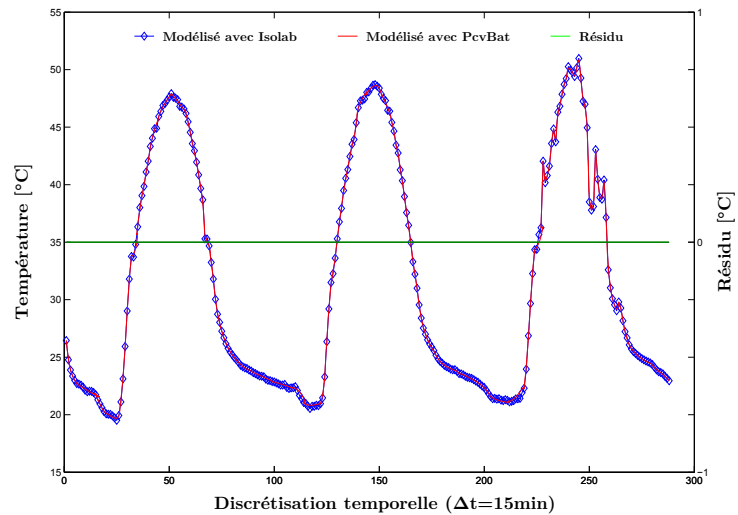


Figure 7.1 – Composition et indicateurs associés au cas d'étude.

7.2 Simulation des cas d'études

7.2.1 Paramètres physiques et données climatiques

Les données météorologiques sont issues du fichier météo associé au lieu d'étude pour une période adaptée aux conditions souhaitées ainsi qu'aux hypothèses de simulation : jours de type 1 (fort ensoleillement, humidité relative et vent faible). Le lieu d'étude est l'IUT de Saint-Pierre de La Réunion, la période choisie est composée des 25 et 26 février 2015. Les valeurs sont présentées par la figure 7.3.

Les paramètres physiques associés aux cas d'études simulés ainsi que la géométrie de leurs toitures sont quant à eux présentés par le tableau 7.1. Par ailleurs, les dimensions des couches de chacune de ces études sont définies par le tableau 1.4 du chapitre III.

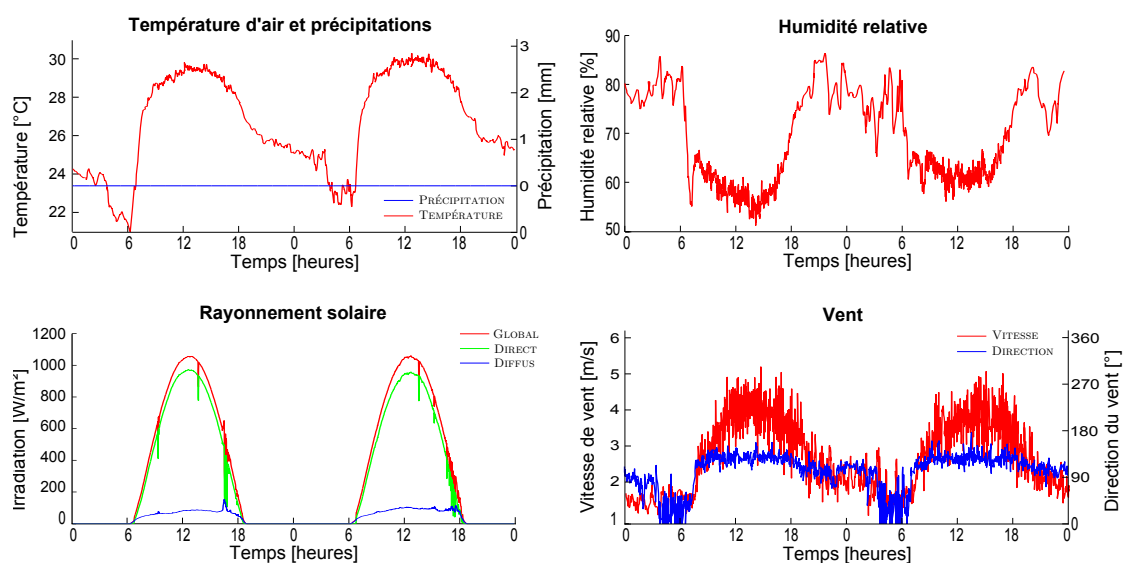


Figure 7.3 – Données météorologiques du 25 au 26/02/2015 utilisées pour la simulation.

Table 7.1 – Paramètres associés à la simulation des 4 cas d'études.

Paramètre	Valeur	Commentaire
Géométrie des toitures étudiées		
Surface	0,6498 m	
Inclinaison	24°	Par rapport au plan horizontal
Orientation	180°	Nord
Longueur	0,9025 m	
Largeur	0,72 m	
Périmètre	3,245 m	
Paramètres communs au 4 cas d'études		
Conductivité thermique air sec	0,026 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	
Masse volumique air sec	1,1773 kg.m ⁻³	
Masse molaire de l'eau	18,00 g.mol ⁻¹	
Masse molaire de l'air sec	29,16 g.mol ⁻¹	
Constante des gaz parfaits	8,3145	
Constante de STEFAN-BOLTZMAN	5,67 · 10 ⁻⁸ W.m ⁻² .K ⁻⁴	
Masse volumique de l'eau liquide	1000 kg.m ⁻³	
Enthalpie massique air sec	1006 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	
Enthalpie massique eau liquide	4186 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	
Émissivité voute céleste	1	Hypothèse corps noir

Suite page suivante

Paramètre	Valeur	Commentaire
Émissivité environnement	0,9	Hypothèse corps gris
Facteur de ciel	0,55	Mesure <i>via</i> TSI ³
Enthalpie massique tôle	502 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	
Masse volumique tôle	7800 kg.m ⁻³	
Conductivité thermique tôle	50 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	
Conductivité hygrique tôle	0 kg.m ⁻² .s ⁻¹	Considérée imperméable
Diffusivité hydrique tôle	0 m ⁻² .s ⁻¹	Considérée imperméable
Modèle T_{vc}	6°C	Paramètre k_{Tvc}

Paramètres associés à la modélisation de l'ISOTEST 1 : Substrat

Enthalpie massique des scories	840 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	
Masse volumique des scories	739 kg.m ⁻³	Mesure
Conductivité thermique des scories	1,273 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Valeur effective. Estimation ⁴ .
Transmittivité CLO des scories	0	
Absorptivité du rayonnement CLO	0,72	Estimation ⁴
Absorptivité du rayonnement GLO	0,95	Hypothèse corps gris
Émissivité des scories	0,9	Hypothèse corps gris IR
Porosité des scories	0,59	Mesure
Vitesse d'air dans les scories	0,271 m.s ⁻¹	Si ΔT ascendant. Estimation ⁴ .
	0 m.s ⁻¹	Si ΔT descendant. Estimation.

Paramètres associés à la modélisation de l'ISOTEST 2 : PCVTh_{ce}

Absorptivité du rayonnement CLO	0,61	Mesure ³
Absorptivité du rayonnement GLO	1	Modèle feuille noires
Émissivité des feuilles	0,9	Mesure ³
Enthalpie massique des feuilles	880 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	[HODO-ABALO, 2013]
Masse volumique des feuilles	1600 kg.m ⁻³	[HODO-ABALO, 2013]
Conductivité thermique des feuilles	0,7 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	[HODO-ABALO, 2013].
Épaisseur des feuilles	4 · 10 ⁻⁴ m	Mesure ³
Largeur des feuilles	2,5 · 10 ⁻³ m	Mesure
Hauteur « verte » des feuilles	5 · 10 ⁻² m	Mesure
Porosité de la canopée	0,932	Mesure
Résistance stomatique minimale	82	[PALOMO DEL BARRIO, 1998]
Modèle résistance stomatique $f_1(\varphi_{CLO})$	0,034	Paramètre A [Tabares-Velasco,2012]
	3,5	Paramètre B [Tabares-Velasco,2012]
Modèle résistance stomatique $f_2(T_f)$	1	Paramètre C [Tabares-Velasco,2012]
	0,0016	Paramètre D [Tabares-Velasco,2012]

Suite page suivante

3. Décrit dans l'annexe D.

4. Issue du post-traitement des données expérimentales.

Paramètre	Valeur	Commentaire
Modèle $r_{st} f_3(P_{v,sf}^{sat} - P_{v,air})$	0,41	Paramètre E [Tabares-Velasco,2012]
Modèle $r_{st} f_5(C_{CO_2})$	0	Paramètre F
Modèle conductivité thermique du substrat	0,17	Paramètre A [Tabares-Velasco,2012]
	1,1	Paramètre B [Tabares-Velasco,2012]
Modèle résistance aérodynamique de la canopée	0	Paramètre ξ_1
	1	Paramètre ξ_2, ξ_3 et ξ_4
ρ_{C_p} substrat sec	541,1 $kJ.m^{-3}.K^{-1}$	Mesure
ω^{sat} du substrat	0,21 $m^3.m^{-3}$	Mesure
Résistance aérodynamique substrat	5000 $m.s^{-1}$	
Paramètre b substrat	1	
Conductivité hydrique à saturation	0,0001 $m.s^{-1}$	Mesure
Potentiel de rétention à saturation	-0,02 m	
Débit irrigation	0,3 $m^3.m^{-2}.s^{-1}$	
Heure de l'irrigation	6 ^h 00	
Durée de l'irrigation	60 min	
Durée du cycle d'irrigation	720 min	
Conductivité hydrique canopée	1 $m.s^{-1}$	Estimation (résistance nulle)

Paramètres associés à la modélisation de l'ISOTEST 3 : Tôle

Transmittivité de la tôle	0	
Absorptivité du rayonnement CLO	0,74	Estimation ³
Absorptivité du rayonnement GLO	0,95	Hypothèse corps gris
Réfectivité de la tôle	0,20	[HODO-ABALO, 2013]
Émissivité de la tôle	0,84	Mesure ³

Paramètres associés à la modélisation de l'ISOTEST 4 : PCV_{Lsa}^{Th}

Absorptivité du rayonnement CLO	0,69	Mesure ³
Absorptivité du rayonnement GLO	1	Modèle feuille noires
Émissivité des feuilles	0,9	Mesure ³
Enthalpie massique des feuilles	880 $J.kg^{-1}.K^{-1}$	[HODO-ABALO, 2013]
Masse volumique des feuilles	1600 $kg.m^{-3}$	[HODO-ABALO, 2013]
Conductivité thermique des feuilles	0,7 $W.m^{-1}.K^{-1}$	[HODO-ABALO, 2013]
Taux de couverture de la canopée	100%	Mesures
LAI	5,65	Mesures ³
Épaisseur des feuilles	$4,46 \cdot 10^{-4} m$	Mesures ³
Surface des feuilles	$14,96 \cdot 10^{-4} m^2$	Mesures ³
Inclinaison des feuilles	21°	Mesures
Résistance stomatique minimale	82	[PALOMO DEL BARRIO, 1998]
Modèle résistance stomatique $f_1(\varphi_{CLO})$	0,034	Paramètre A [Tabares-Velasco,2012]

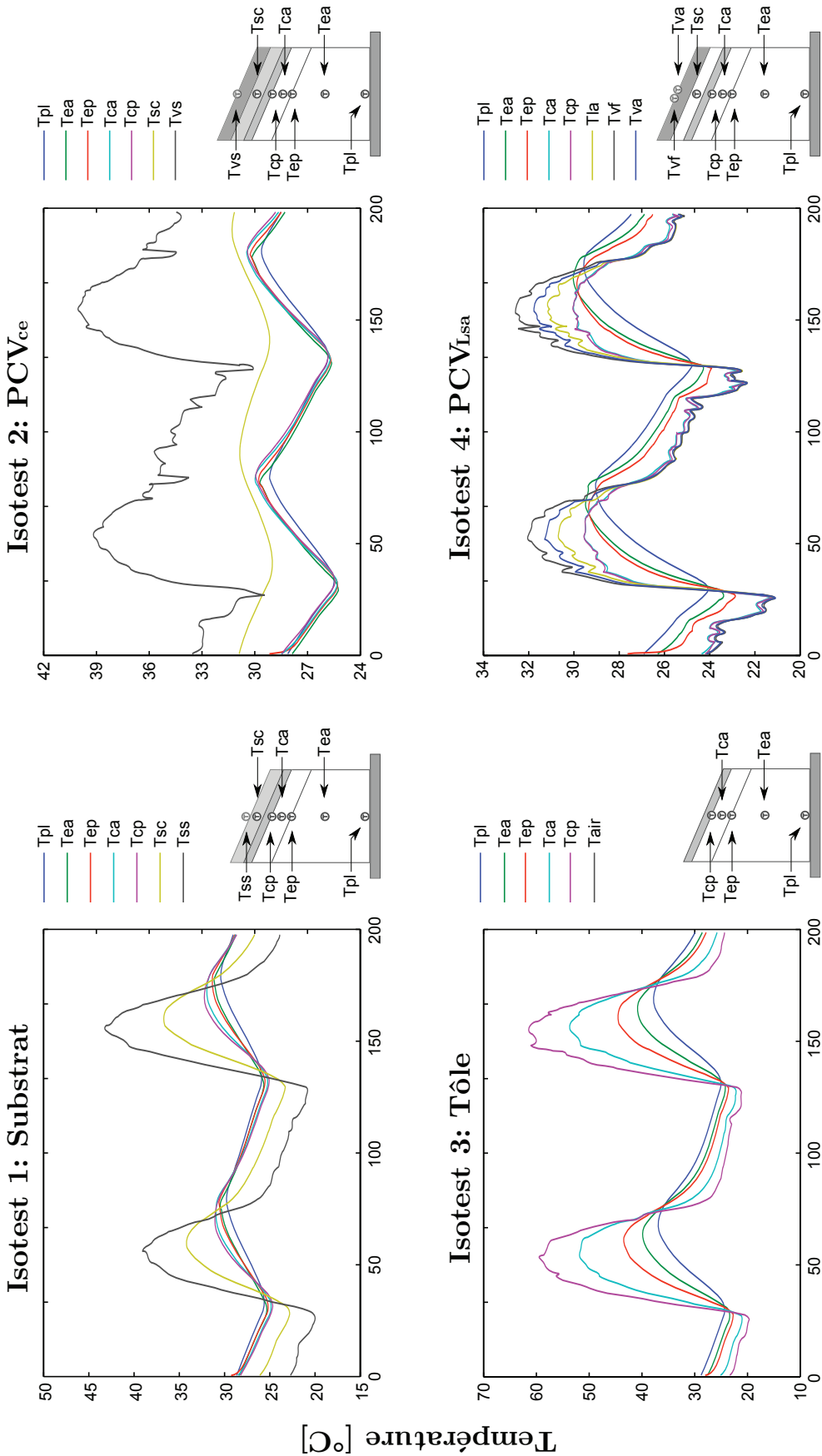
Suite page suivante

Paramètre	Valeur	Commentaire
	3,5	Paramètre B [Tabares-Velasco,2012]
Modèle résistance stomatique	1	Paramètre C [Tabares-Velasco,2012]
$f_2(T_f)$	0,0016	Paramètre D [Tabares-Velasco,2012]
Modèle $r_{st} f_3(P_{v,sf}^{sat} - P_{v,air})$	0,41	Paramètre E [Tabares-Velasco,2012]
Modèle $r_{st} f_5(C_{CO_2})$	0	Paramètre F
Modèle absorptance	0,69	Paramètre A CLO
	1	Paramètre A GLO
Modèle transmittance	1	Paramètre T CLO
	1	Paramètre T GLO
Modèle coefficient d'extinction radiatif	$47,188 \cdot 10^{-3}$	Paramètre a. Optimisé
	0	Paramètre b. Optimisé
	Vecteur horaire	Paramètre β . Empirique ³
Modèle tracé de rayon	0,1	Critère d'arrêt CLO
	0,1	Critère d'arrêt GLO
Modèle coefficient de convection cinématique forcée feuille/air	0	Paramètre A
	1	Paramètres B et C
	0,0051	Paramètre D
Modèle coefficient de convection cinématique forcée air/air	0	Paramètre A
	1	Paramètres B et C
	0,0051	Paramètre D
Modèle coefficient de convection cinématique forcée tôle/lame d'air	0	Paramètre A
	1	Paramètres B et C
	0,0051	Paramètre D

7.2.2 Présentation des résultats

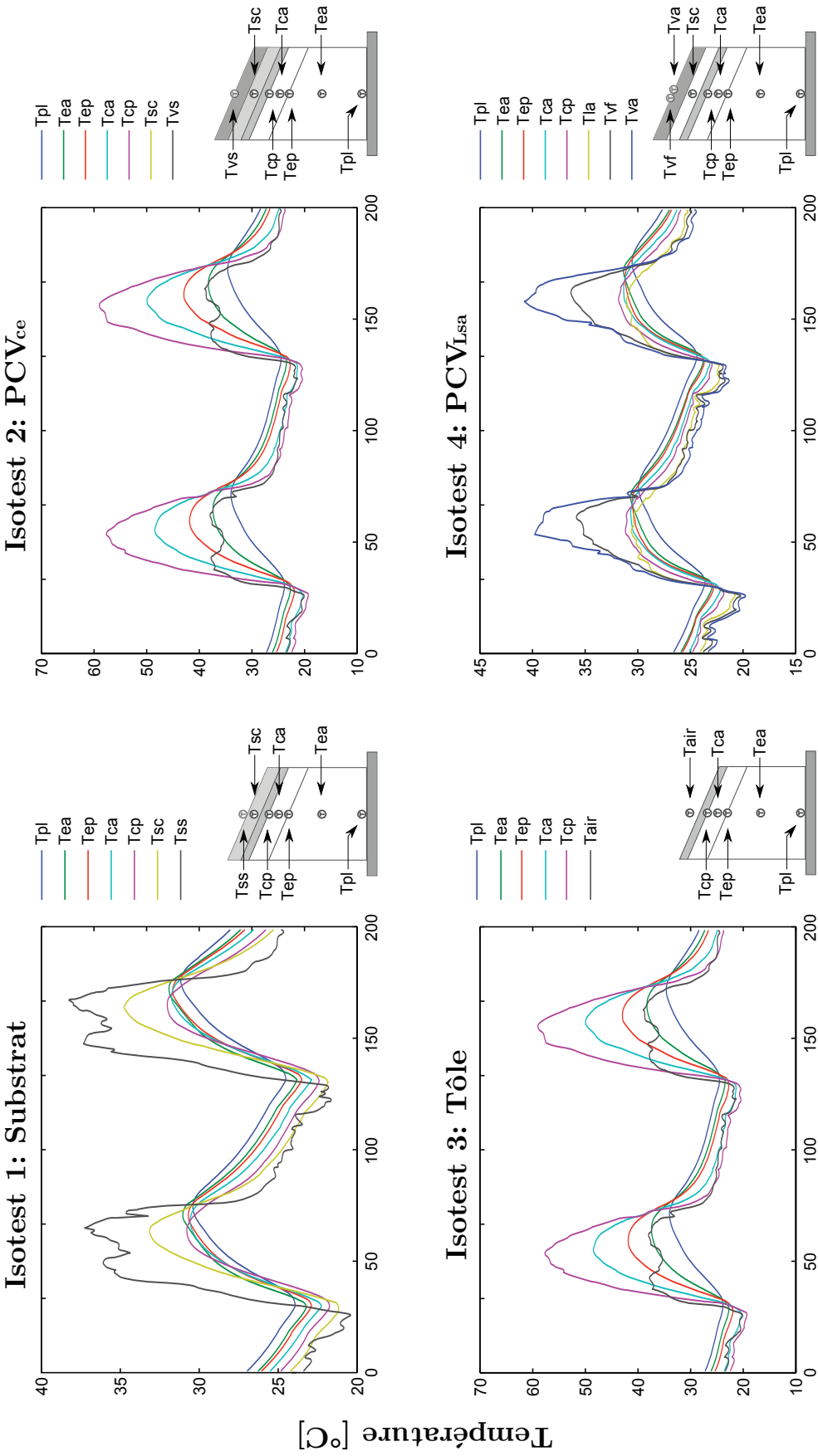
Les résultats des simulations sont présentés sous forme de profils de température comprenant les températures du plancher jusqu'à la surface de la toiture étudiée. Les positions sont identiques pour chacun des tests lorsque la configuration le permet. Celles-ci sont explicitées *via* un schéma présent sur chacun des graphiques.

Les figures 7.4 et 7.5 expriment les températures mesurées et simulées pour les quatre configurations des ISOTEST. Nous constatons que les valeurs simulées ont une dynamique et une amplitude conformes aux valeurs mesurées. En effet, pour la toiture témoin (tôle), la température maximale mesurée de la tôle avoisine en moyenne les 59°C lorsque le rayonnement solaire est à environ 1050 W.m⁻² et 62°C pour les valeurs simulées. Pour les configurations PCV $_{L_{sa}}^{T_h}$ ou substrat, les variations quotidiennes maximales des températures mesurées des surfaces des tôles sont d'environ 33°C contre 32°C pour les valeurs simulées. Pour la PCV $_{ce}^{T_h}$ ces valeurs sont de 28°C pour les mesures et de 30°C pour les simulations. Ainsi, bien que les profils ne soient pas identiques, les tendances sont respectées, ce qui tend à confirmer que les phénomènes prépondérants sont considérés. Toutefois, des défauts d'amplitudes ainsi que de légers déphasages sont présents. La comparaison modèle/mesure proposée dans les paragraphes suivants permet d'aborder ces notions.



Discrétisation temporelle ($\Delta t=15\text{min}$)

Figure 7.4 – Simulation du comportement thermique des ISOTEST les 25 et 26/02/2015.



Discrétisation temporelle ($\Delta t=15min$)

Figure 7.5 – Comportement thermique expérimental des ISOTEST les 25 et 26/02/2015.

7.3 Éléments de validation

Dans le but d'apporter des éléments de validation quant aux modèles, les données issues de la simulation sont confrontées à celles provenant de l'expérience pour chacun des indicateurs présentés précédemment (profils de température), ainsi que pour les humidités relatives dans le cas des PCV. Tous ces comparatifs sont représentés sur les figures 7.6 à 7.9.

7.3.1 Généralités

Dans un premier temps, la dynamique des indicateurs ainsi que les erreurs associées permettent de définir la cohérence du modèle vis-à-vis de la réalité physique. Ensuite, la validité du modèle est définie. La finalité des modèles mis en œuvre étant de prédire la température de surface interne de la paroi, la conformité des modèles testés est alors définie vis-à-vis de leurs températures de tôle. Plus exactement, en physique du bâtiment, un modèle est classiquement considéré conforme à la mesure si le résidu est inférieur à 10% de l'amplitude de la grandeur considérée [MIRANVILLE, 2002]. Afin de faciliter cette comparaison, les erreurs associées au résidu (ε) sont présentées. Elles sont définies par l'équation 7.1, où R_{max} est le résidu maximal et A l'amplitude de la grandeur considérée. *Nota* : lors de l'expression du résidu moyen sur une plage de temps, la précision est obtenue par calcul de l'écart-type.

$$\varepsilon = \frac{R_{max}}{A} \quad (7.1)$$

Afin de visualiser aisément les champs thermiques, et les erreurs associées à leurs modélisation, les profils de températures sont représentés. Par souci de clarté, les nœuds associés sont nommés selon la nomenclature suivante :

T_{pl}	la température de plancher ;
T_{ep}	la température en sous-face du BA13 ;
T_{ca}	la température au centre de la lame d'air confinée ;
T_{cp}	la température de tôle ;
T_{sc}	la température au centre du substrat ;
T_{ss}	la température de surface de substrat ;
T_{vs}	la température en surface de la végétation (ISOTEST 2) ;
T_{la}	la température au centre de la lame d'air non confinée (ISOTEST 4) ;
T_{vf}	la température en surface de la canopée (feuille, ISOTEST 4) ;
T_{va}	la température en surface de la canopée (air, ISOTEST 4) ;
HR_{vs}	l'humidité relative en surface de la canopée (ISOTEST 2) ;
HR_{la}	l'humidité relative dans la lame d'air non confinée (ISOTEST 4) ;
HR_{va}	l'humidité relative dans la canopée (ISOTEST 4).

7.3.2 Cas de la tôle

Cas d'étude le plus simple, la modélisation de la toiture tôle possède un résidu circadien moyen de $1,7 \pm 1,6^\circ\text{C}$, dont la composante principale est diurne avec un résidu moyen de $2,9 \pm 1,0^\circ\text{C}$, se répercutant dans tout le système et induisant un résidu compris sur $[0,0 ; 6,5]^\circ\text{C}$.

Considérant la dynamique et les résidus en présence (fig. 7.8), les principaux phénomènes gouvernant le champ thermique du système ont été pris en compte. De plus, avec une erreur de 14,9% ($\varepsilon < 10\%$), le modèle est considéré non conforme pour les conditions météorologiques testées. Par ailleurs, toutes les erreurs associées aux profils de températures sont supérieures au critère requis (tab. 7.3).

L'origine de l'erreur sur la température de tôle peut provenir des paramètres thermophysiques utilisés pour ce matériau, mais également de l'impact des sollicitations radiatives et convectives externes. Considérant la forte effusivité et la faible épaisseur du matériau, la seconde hypothèse semble la plus indiquée.

Table 7.3 – Données statistiques de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 3

	Résidu (R_{max})	Écart-type	Erreur (ε)
T_{pl}	3,8°C	$\pm 0,9^\circ\text{C}$	34,1%
T_{ea}	2,8°C	$\pm 0,6^\circ\text{C}$	16,3%
T_{ep}	2,7°C	$\pm 0,4^\circ\text{C}$	11,6%
T_{ca}	6,4°C	$\pm 1,6^\circ\text{C}$	19,4%
T_{cp}	6,5°C	$\pm 1,6^\circ\text{C}$	14,9%

7.3.3 Cas du substrat

La modélisation de la toiture composée d'une tôle et de scories possède à sa surface un résidu circadien moyen de $1,8 \pm 2,7^\circ\text{C}$. Celui-ci induit sur la tôle un résidu moyen de $1,8 \pm 1,3^\circ\text{C}$, dont la composante principale est nocturne avec un résidu moyen de $2,5 \pm 0,6^\circ\text{C}$, se répercutant dans tout le système et induisant un résidu compris sur $[0,0; 3,4]^\circ\text{C}$.

Aux vues de la dynamique et des résidus en présence (fig. 7.6), les principaux phénomènes gouvernant le champ thermique du système ont été considérés dans le modèle. Par contre, l'erreur relative moyenne étant de 28,6%, le modèle est considéré non conforme pour les conditions météorologiques testées. De plus, avec une erreur de 56,1% (Tab. 7.4) en surface du substrat, le modèle peut être affiné. Au regard des erreurs et résidus en présence, l'origine de l'erreur sur la tôle est très probablement issue des paramètres associés aux sous modèles des phénomènes à l'interface entre le substrat et l'air extérieur. Il apparaît que la température simulée de T_{ss} suit la dynamique de l'irradiation solaire, alors que son homologue expérimental est impacté par un phénomène limitant : le plus influant est probablement la convection externe. Le modèle de convection étant identique à celui utilisé pour la tôle, ceci n'est pas surprenant : il est nécessaire d'adapter ses paramètres aux spécificités du substrat (rugosité et macro-porosité).

De plus, en ce qui concerne les confrontations des températures au centre du substrat (T_{sc}) ainsi que celles de la tôle (T_{cp}), le déphasage et l'intensité augmentent : caractéristiques d'un problème d'inertie. Les paramètres thermophysiques⁵ des scories ainsi que la vitesse de l'air dans le milieu semblent en être l'origine.

Table 7.4 – Données statistiques de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 1

	Résidu (R_{max})	Écart-type	Erreur (ε)
T_{pl}	2.0°C	$\pm 1,1^\circ\text{C}$	25.6%
T_{ea}	2.2°C	$\pm 1,3^\circ\text{C}$	24.2%
T_{ep}	3.2°C	$\pm 1,2^\circ\text{C}$	34,0%
T_{ca}	3.0°C	$\pm 1,1^\circ\text{C}$	28,3%
T_{cp}	3.4°C	$\pm 1,4^\circ\text{C}$	28,6%
T_{sc}	3.8°C	$\pm 0,6^\circ\text{C}$	24,7%
T_{ss}	10.8°C	$\pm 2,8^\circ\text{C}$	56,1%

5. Il s'agit ici de la conductivité thermique équivalente (λ_{sf}) et de l'inertie équivalente $(\rho c_p)_{sf}$ du complexe scories+air.

7.3.4 Cas de la PCV_{ce}^{Th}

Cas d'étude plus complexe, la modélisation de la toiture composée d'une tôle, de substrat et de gazon possède à sa surface un résidu circadien moyen de $8,4 \pm 2,4^\circ\text{C}$. Celui-ci induit sur la tôle un résidu circadien moyen de $1,7 \pm 0,6^\circ\text{C}$, dont la composante principale est nocturne (à l'instar du cas d'étude « substrat ») avec un résidu moyen de $1,9 \pm 0,6^\circ\text{C}$, se répercutant dans tout le système et induisant un résidu compris sur $[0,0; 3,2]^\circ\text{C}$.

Aux vues de la dynamique et des résidus en présence (fig. 7.7), les principaux phénomènes gouvernant le champ thermique du système ont été considérés dans le modèle. De plus, l'erreur étant de 75,8%, le modèle est donc considéré non conforme pour les conditions météorologiques testées. Les erreurs associées aux températures de substrat (145,6%), de surface de la canopée (79,0%) et à l'humidité relative (117,0%) sont également bien au-delà de l'erreur autorisée (tab. 7.5).

L'origine des erreurs sur la température de tôle (intensité des variations trop faible) provient principalement de la température du substrat (T_{sc}). Cette dernière est gouvernée par l'inertie thermique du substrat, ainsi que par l'évaporation et occasionnellement par l'infiltration de l'eau liquide, impactant le champ thermique (à l'origine des fronts⁶ de températures). Mis à part les fronts⁷, il apparaît un biais de l'ordre 4°C (pas de déphasage); celui-ci est très certainement lié à l'évaporation, mais aussi à la température de surface de la végétation⁸ (T_{vs}), qui elle-même dépend principalement des phénomènes d'irradiation, de convection, de transpiration, ainsi que de diffusion thermique. Considérant le nombre et la complexité des phénomènes à l'œuvre, il est très délicat de juger de l'origine de l'erreur observée. Seule une analyse numérique, telle qu'une analyse de sensibilité, permettrait d'apporter des éléments de réponse et donc des pistes d'amélioration.

Enfin, l'humidité relative en surface du gazon possède une dynamique adéquate ainsi qu'un problème de biais et d'amplitude conduisant à un résidu diurne⁹ moyen de $31,3 \pm 2,3\%$. Tous deux sont susceptibles d'être liés à la considération de la convection¹⁰ et/ou de la transpiration. À noter que les paramètres associés à ces phénomènes ne sont pas définis spécifiquement pour la végétation utilisée, ce qui pourrait expliquer la forte erreur observée; de plus, le résidu de température ($5,6^\circ\text{C}$ en journée et $9,8^\circ\text{C}$ la nuit) joue également un rôle non négligeable.

7.3.5 Cas de la PCV_{Lsa}^{Th}

Cas d'étude également complexe, la modélisation de la toiture composée d'une tôle et d'une liane positionnée au dessus d'une lame d'air possède à sa surface des résidus circadiens moyens de $1,1 \pm 1,5^\circ\text{C}$ et $2,3 \pm 3,3^\circ\text{C}$, respectivement pour les feuilles et l'air. Ceux-ci induisent sur la tôle un résidu circadien moyen de $1,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$, dont la composante principale est diurne (à l'instar du cas d'étude « tôle ») avec un résidu moyen de $1,3 \pm 0,7^\circ\text{C}$, se répercutant dans tout le système et induisant un résidu compris sur $[0,0; 3,7]^\circ\text{C}$.

Aux vues de la dynamique et des résidus en présence (fig. 7.9), les principaux phénomènes gouvernant le champ thermique du système ont été considérés dans le modèle. De plus, l'erreur étant de 29,8%, le modèle est considéré non conforme pour les conditions météorologiques testées. Par ailleurs, les erreurs associées aux températures de la lame d'air (17,1%), ainsi que d'air (43,2%) et de feuilles (27,0%) en surface de la canopée sont également non conformes, tout comme l'erreur associée à l'humidité relative (53,2%, tab. 7.6). Au regard de l'évolution des résidus le

6. Ces sauts de température ont dans le cas présent une amplitude allant de $0,2^\circ\text{C}$ à $1,5^\circ\text{C}$.

7. Le modèle associé à l'impact thermique du déplacement hydrique dans le substrat est basé sur l'hypothèse d'une température de substrat et d'eau équivalente, l'erreur associée à celle-ci étant considérée négligeable.

8. Puisque, considérant les propriétés structurelles spécifiques du *zoysia tenuifolia*, suite à l'homogénéisation, celle-ci est considérée comme un matériau homogène et uniforme.

9. L'humidité relative étant observée uniquement afin de prédire correctement les phénomènes de changement de phases (évaporation et transpiration) dus à leurs impacts sur le champ thermique, l'erreur observée est par conséquent diurne.

10. Considérant le gradient d'humidité relative entre l'extérieur et la canopée, le phénomène convectif est particulièrement sensible.

Table 7.5 – Données statistiques de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 2

	Résidu (R_{max})	Écart-type	Erreur (ε)
T_{pl}	1,7°C	$\pm 0,8^\circ\text{C}$	28,9%
T_{ea}	2,1°C	$\pm 1,1^\circ\text{C}$	29,5%
T_{ep}	3,2°C	$\pm 1,1^\circ\text{C}$	49,6%
T_{ca}	2,7°C	$\pm 0,7^\circ\text{C}$	50,9%
T_{cp}	3,0°C	$\pm 0,6^\circ\text{C}$	75,8%
T_{sc}	5,2°C	$\pm 0,4^\circ\text{C}$	145,6%
T_{vs}	11,7°C	$\pm 2,4^\circ\text{C}$	79,0%
HR_{vs}	50,2%	$\pm 11,5\%$	117,0%

long du profil de températures, et puisque la canopée est un milieu semi-transparent, l'erreur de la température de tôle provient principalement des paramètres des modèles définissant les phénomènes radiatifs et convectifs au contact de la tôle.

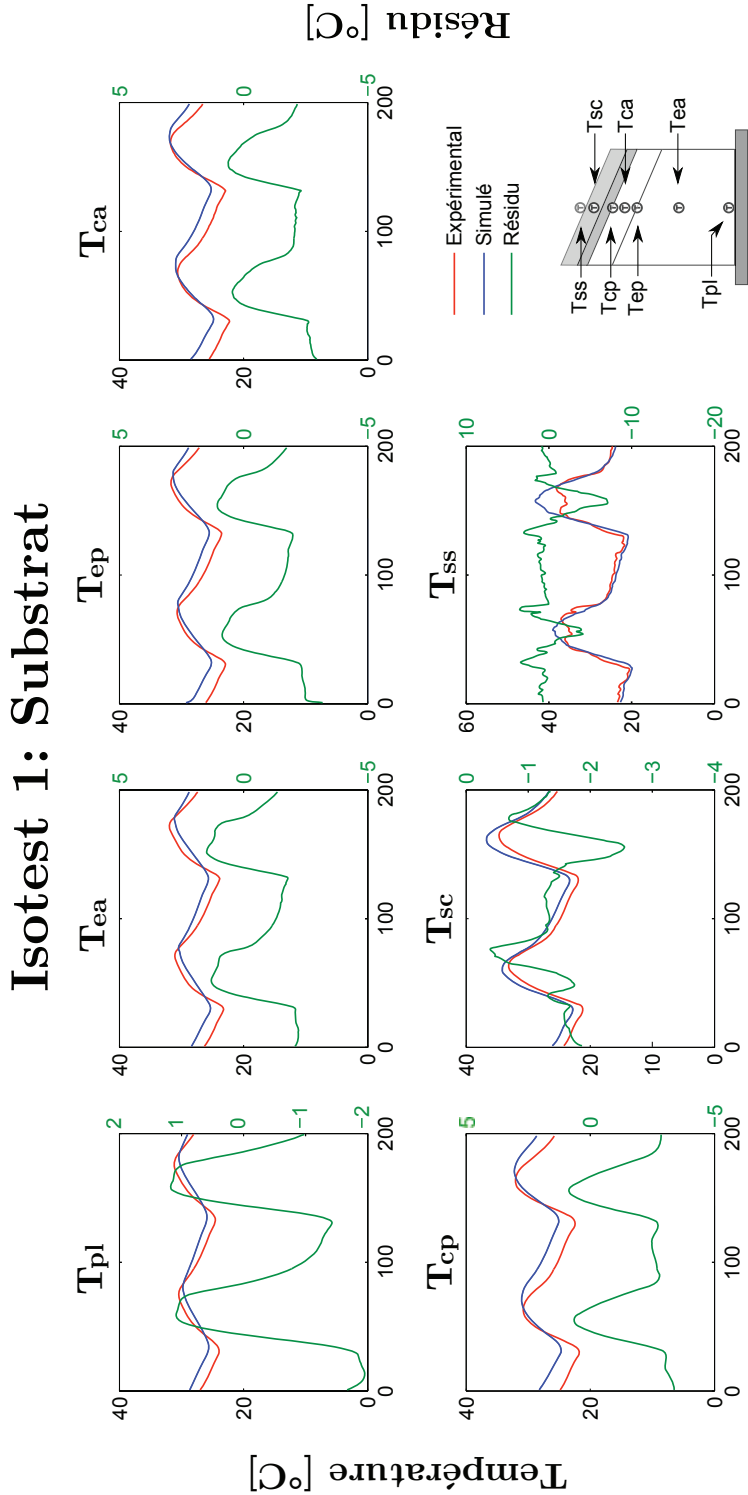
À noter que l'erreur associée à T_{vf} n'est pas surprenante, car outre les paramètres préliminaires utilisés pour la convection, le modèle de résistance stomatique de type multiplicatif est connu pour nécessiter une adaptation paramétrique à chaque cas d'étude [MISSON et al., 2004]. Cette nécessité proviendrait de l'hypothèse d'indépendance entre les facteurs, source des principales critiques de ce type de modèles [DAMOUR, 2008]. L'origine de cette erreur est corroborée par la forte erreur associée à l'humidité relative.

Enfin, à l'instar de la PCV_{ce}^{Th} , l'humidité relative dans la lame d'air possède une dynamique adéquate ainsi qu'un problème de biais et d'amplitude, conduisant à une erreur de 63,1%. Tous deux sont susceptibles d'être liés¹¹ à la considération de la convection¹⁰ et/ou de la transpiration. Pour ce qui est de l'humidité relative en surface de la canopée, seule l'amplitude semble inadaptée, induisant une erreur diurne moyenne de 53,2%. Comme précédemment celle-ci peut être due à la considération de la transpiration et/ou de la convection. À noter que dans ce cas l'erreur de température en journée ($2,1 \pm 1,4^\circ\text{C}$ contre $0,6 \pm 0,6^\circ\text{C}$ la nuit) peut avoir un rôle non négligeable.

Table 7.6 – Données statistiques de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISOTEST 4

	Résidu (R_{max})	Écart-type	Erreur (ε)
T_{pl}	1,4°C	$\pm 0,5^\circ\text{C}$	19,4%
T_{ea}	1,6°C	$\pm 0,7^\circ\text{C}$	19,2%
T_{ep}	1,9°C	$\pm 0,8^\circ\text{C}$	21,3%
T_{ca}	3,7°C	$\pm 1,2^\circ\text{C}$	38,6%
T_{cp}	3,2°C	$\pm 1,0^\circ\text{C}$	29,8%
T_{la}	1,9°C	$\pm 0,4^\circ\text{C}$	17,1%
T_{vf}	4,6°C	$\pm 1,6^\circ\text{C}$	27,0%
T_{va}	9,8°C	$\pm 3,3^\circ\text{C}$	43,2%
HR_{la}	14,2%	$\pm 5,3\%$	63,1%
HR_{va}	12,6%	$\pm 7,2\%$	53,2%

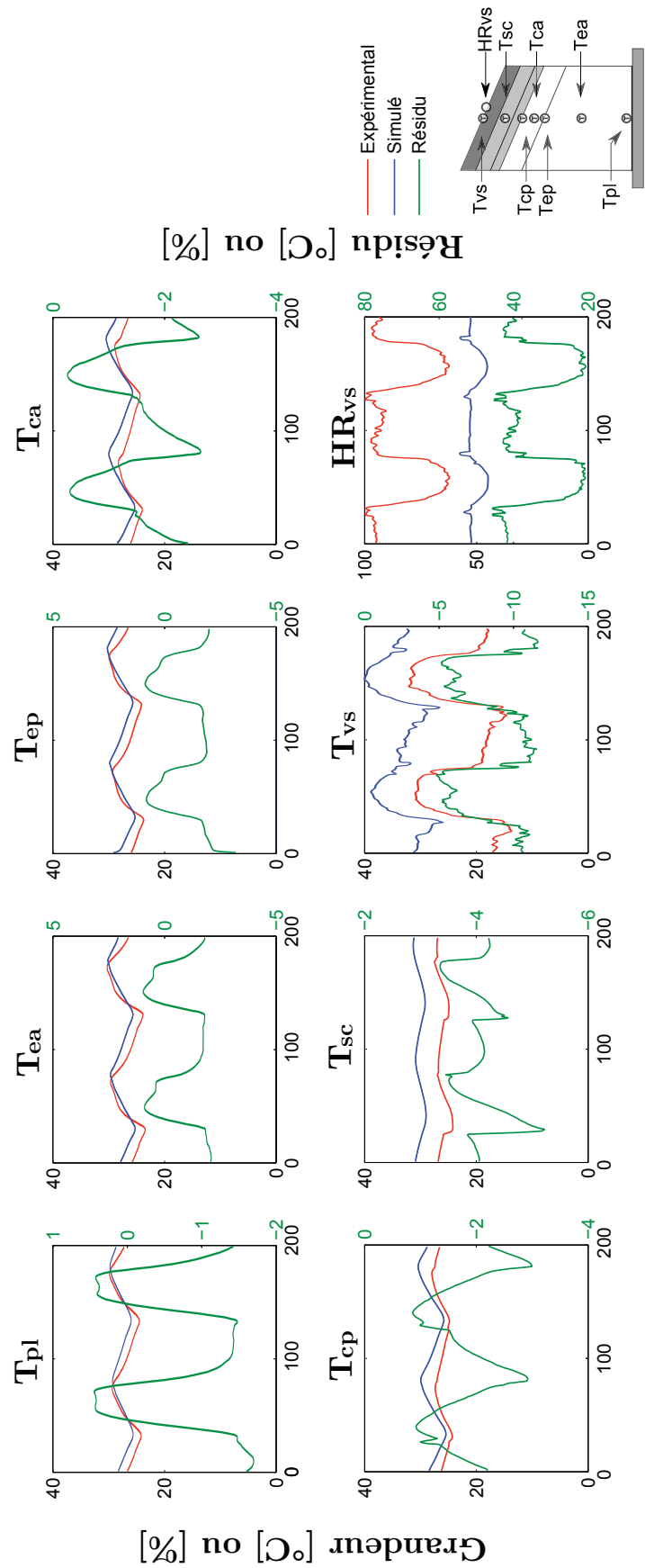
11. À noter que dans ce cas l'erreur de température ($0,2 \pm 0,2^\circ\text{C}$ en journée et $0,3 \pm 0,4^\circ\text{C}$ la nuit) joue un rôle peu important.



Discretisation temporelle ($\Delta t=15\text{min}$)

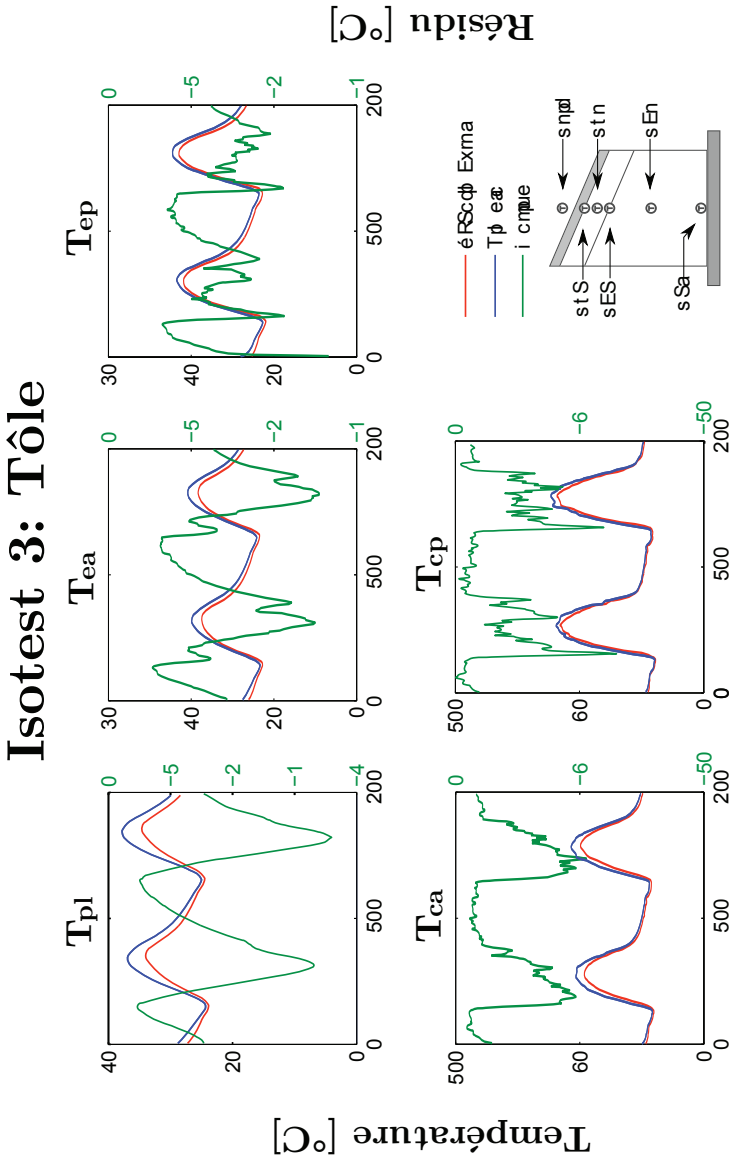
Figure 7.6 – Comparaison des grandeurs mesurées et simulées pour l'ISOTEST 1 (substrat).

Isotest 2: PCV_{ce}



Discretisation temporelle ($\Delta t=15\text{min}$)

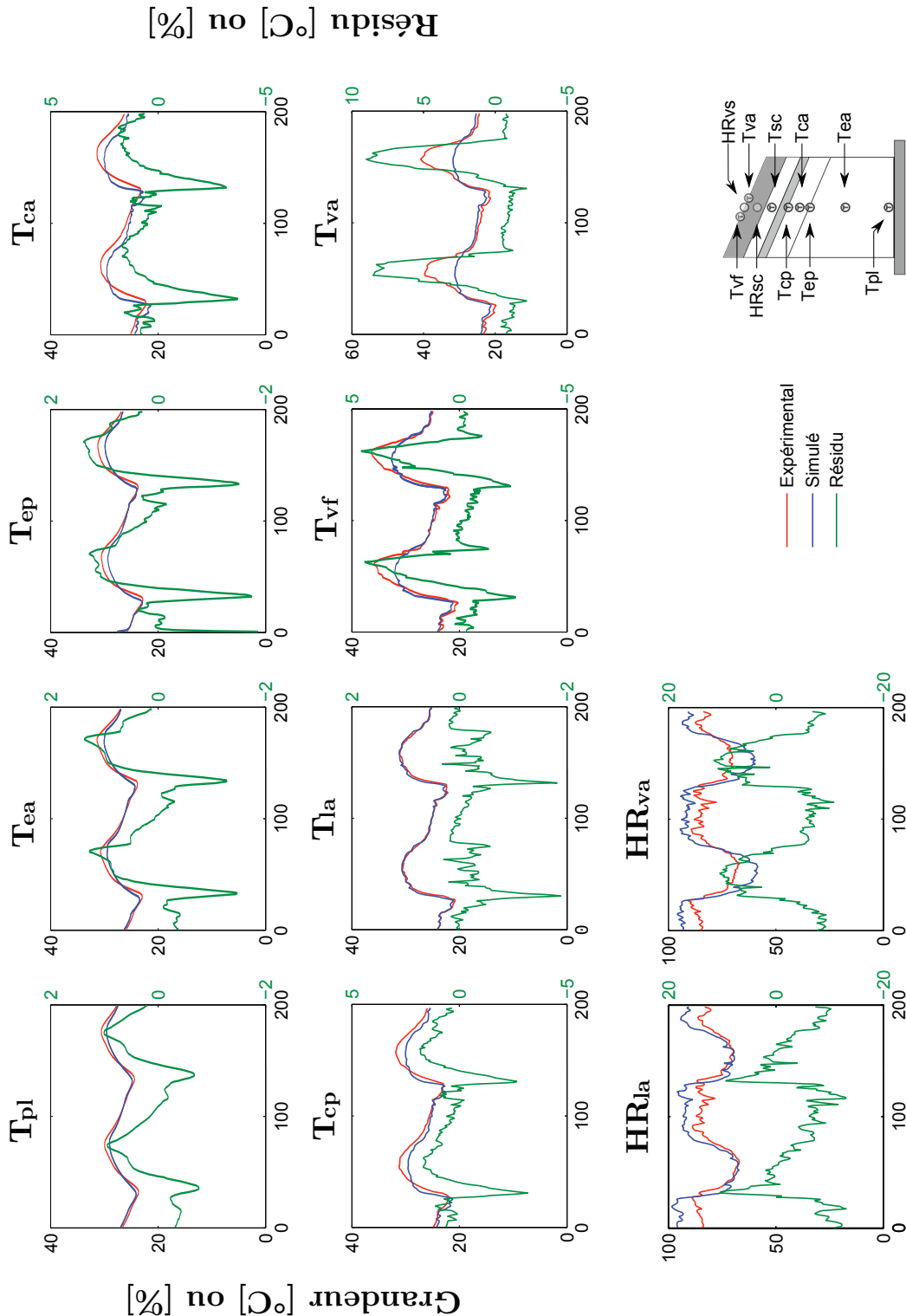
Figure 7.7 – Comparaison des grandeurs mesurées et simulées pour l'ISOTEST 2 (PCV_{ce}^{T_h}).



Discrétisation temporelle ($\Delta t=15min$)

Figure 7.8 – Comparaison des grandeurs mesurées et simulées pour l'ISOTEST 3 (tôle).

Isotest 4: PCV Lsa



Discretisation temporelle ($\Delta t=15\text{min}$)

Figure 7.9 – Comparaison des grandeurs mesurées et simulées pour l'ISOTEST 4 (PCV^{Lsa}).

7.3.6 Aspects dynamiques

— Corrélations modèles/mesures —

Afin d'apprécier le comportement dynamique des résidus, les corrélations des températures de tôles simulées et mesurées sont tracées pour chacune des ISOTEST (fig. 7.10 et 7.11).

Pour la modélisation de l'ISOTEST 3, configuration tôle nue, nous constatons que le coefficient de corrélation est proche de 1, ainsi qu'une faible dispersion au niveau des données simulées. Nous constatons aussi que le modèle décroche de façon atténuée sur les périodes méridiennes d'environ 3°C à 6°C. Globalement, la modélisation l'ISOTEST 3 s'avère cohérente.

Il apparaît que la modélisation de la $PCV_{ce}^{T_h}$ ($R^2=0,8963$) a tendance à faire une surestimation de température moyenne au niveau de la tôle d'environ 2°C. Par ailleurs, la dynamique sur les trois jours de la courbe est correcte, mais il y a un offset dès le début de la modélisation. Pour palier à cette contrainte, il faudra faire une optimisation sur les paramètres du modèle de $PCV_{ce}^{T_h}$, avec une attention particulière pour les conditions initiales.

Contrairement à la $PCV_{ce}^{T_h}$, la configuration tôle+substrat (ISOTEST 1, $R^2=0,8778$), a tendance à diminuer l'amplitude crête-à-crête des données des températures simulées et les déphaser dans la deuxième partie de la journée. Là encore, pour s'affranchir de ces décrochages de données simulées, il faudra faire une optimisation sur les paramètres du modèle.

Les résultats de la modélisation de la $PCV_{Lsa}^{T_h}$ ($R^2=0,8949$) montre un paramétrage assez satisfaisant au niveau des résultats. Il est à noter que les décrochages des températures aux heures méridiennes doivent être très probablement liés à la modélisation de la transpiration de la plante. En effet, c'est à ces heures chaudes que le phénomène est à son maximum et une optimisation sur les paramètres du modèle semble être primordiale.

— Évolution des profils de température —

L'objectif des paragraphes suivants est de présenter l'évolution des comportements thermiques sur 24 heures. L'étude porte sur une journée de type 1 (25 février 2015) : avec un fort ensoleillement (1055,5 W/m² à 12h52), sans nuages et une humidité relative de l'air ambiant (HR_{ae}) classique pour un milieu tropical humide (HR_{ae} varie entre 70% et 90%, fig. 7.12). Afin de permettre l'étude sur 24 heures, la journée a été scindée en 8 tranches, soit une analyse toutes les 3 heures. Ce découpage temporel permet d'observer de façon équitable les impacts thermiques sur les parois complexes lors des phases diurne et nocturne de la journée. Pour des raisons de commodités, il est à noter que les valeurs des températures d'air extérieur (mesurées et simulées) ont toutes été calées sur les valeurs expérimentales T_{ae} .

Les figures 7.13 à 7.18 montrent que pendant la période nocturne (18h00 à 6h00), les températures (simulées et mesurées) des surfaces des tôles des quatre ISOTEST ont des résidus inférieurs à 6°C. Les températures de tôle des ISOTEST avec surtoiture sont toutes inférieures à celles de la toiture de référence (tôle nue). Cela est dû au fait que ces surtoitures, composées de scories et/ou de végétation, protègent thermiquement la toiture pendant la nuit, diminuant très fortement le transfert thermique.

Les figures 7.15 et 7.16, indiquent que le modèle de la $PCV_{ce}^{T_h}$ surestime de façon non négligeable les températures dans toutes les couches. Cela est d'autant plus marquant lors de la phase nocturne (environ 10°C d'écart en moyenne) au niveau de la couche végétale. Nous constatons aussi que pendant la période diurne (6h00 ; 18h00), les températures (simulées et mesurées) des surfaces des tôles avec surtoiture (ISOTEST 1, 2 et 4) ont des valeurs très proches (résidu inférieur à 5°C), et des températures inférieures aux températures de tôle de l'ISOTEST 3 (tôle nue). Cela est cohérent, car lié au fait que ces trois parois complexes protègent de l'ensoleillement.

À midi avec une température d'air extérieur d'environ 30°C, la température de surface

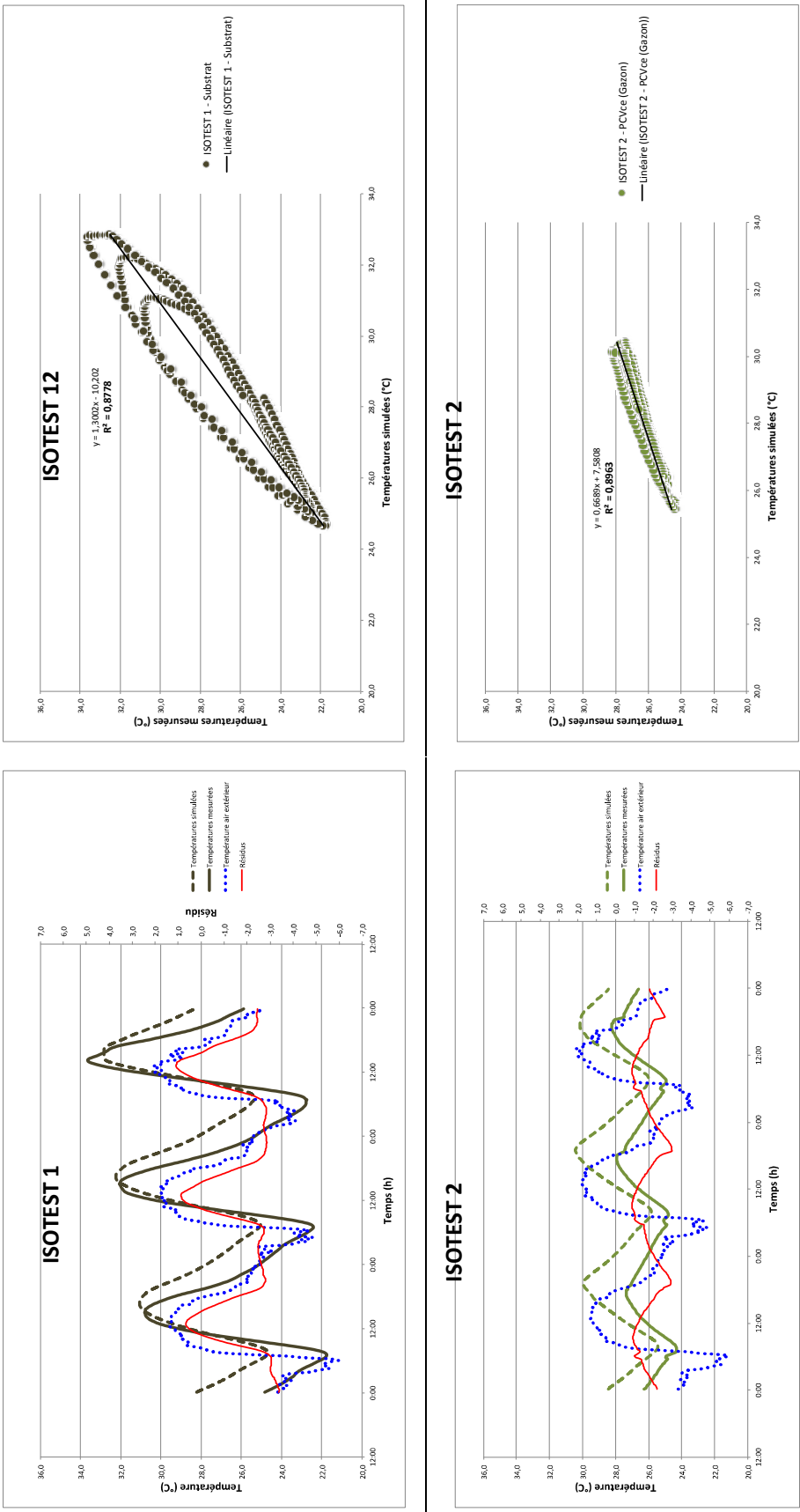


Figure 7.10 – Confrontations Modèle-Mesure des températures au niveau des tôles des ISOTEST 1 et 2

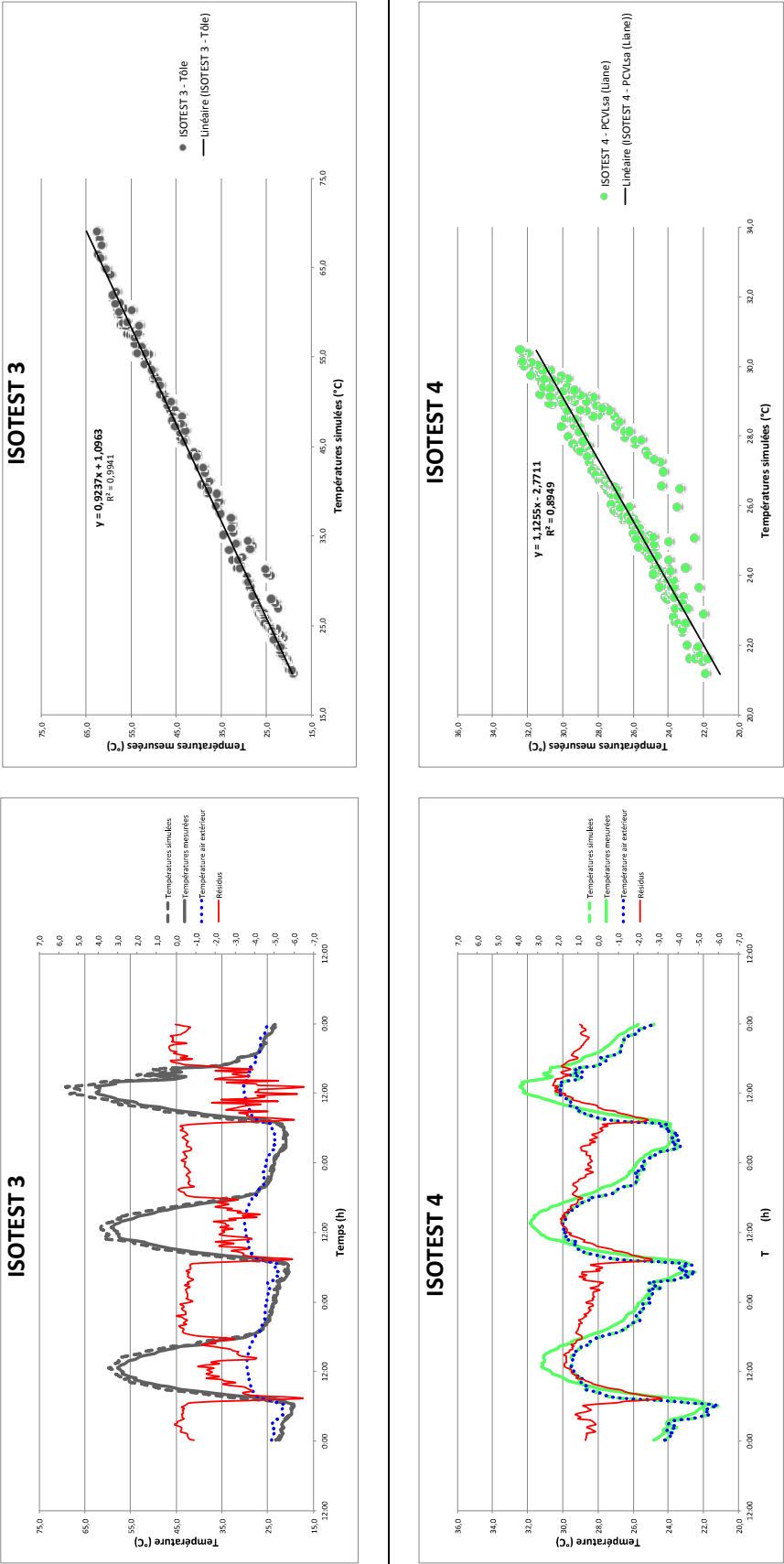


Figure 7.11 – Confrontations Modèle-Mesure des températures au niveau des tôles des ISOTEST 3 et 4

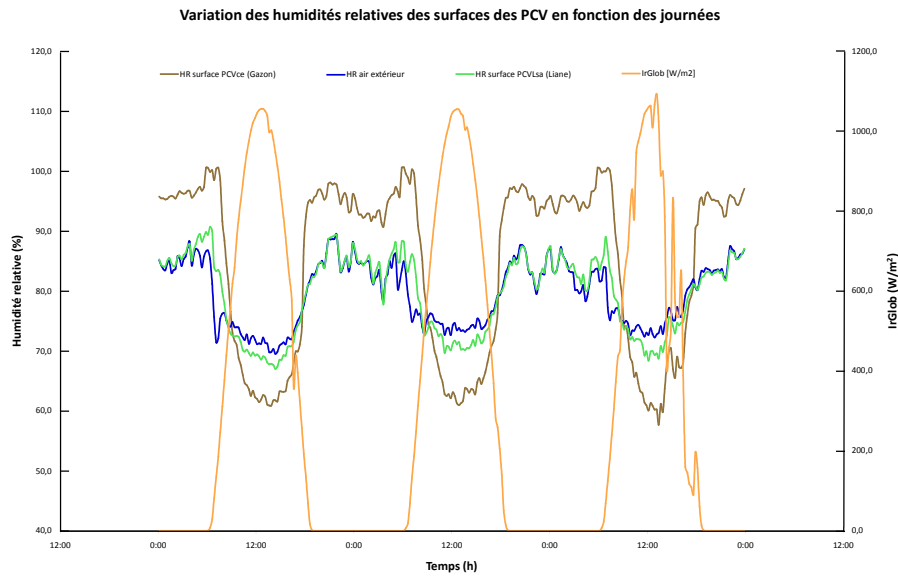


Figure 7.12 – Variation des humidités relatives au niveau des surfaces des $PCV_{ce}^{T_h}$ et $PCV_{Lsa}^{T_h}$.

extérieure de la $PCV_{ce}^{T_h}$, est inférieure à environ 26°C, alors que les températures dans les autres configurations sont plus élevées et atteignent 57°C pour la tôle nue ; constat similaire pour les températures simulées. Il y a une différence de température de l'ordre de 30°C entre les deux configurations.

L'humidité relative et la température de l'air enregistrées au cours de la période diurne (environ 74% pour 29°C) rendent possible l'évapotranspiration des plantes. L'évapotranspiration se fait sentir au plus proche de 12h00, l'impact de ce phénomène apparaît bien dans les températures simulées : il y a un décrochage des valeurs des températures pour la $PCV_{ce}^{T_h}$ et la $PCV_{Lsa}^{T_h}$. Les erreurs de modélisation atteignent les 8°C, valeur importante au vu des températures de surfaces des PCV à cette heure.

Ces résultats permettent de conclure que l'effet simulé des PCV se rapproche des données mesurées, avec un décrochage corrélé à l'intensité de l'irradiation. Sous réserve d'un réajustement et d'une optimisation des paramètres des modèles, les modèles des quatre ISOTEST sont alors conformes à la réalité physique des phénomènes observés.

Enfin, les profils présentés permettent de vérifier l'hypothèse de linéarité posée lors de la modélisation pour chacun des cas d'étude suivants.

- ISOTEST 1 : celle-ci est valide pour la configuration *substrat*, la nuit et en milieu de journée, mais plus difficile à conforter en matinée ou soirée (lors de la charge/décharge thermique du milieu) ;
- ISOTEST 2 : pour la $PCV_{ce}^{T_h}$, l'hypothèse est vérifiée uniquement à 18h00, ce qui est dû à l'arrosage, dont l'impact thermique est à optimiser au regard du profil simulé ;
- ISOTEST 4 : pour la $PCV_{Lsa}^{T_h}$, il s'avère que l'hypothèse est vérifiée tant que l'irradiation solaire est faible (non valide aux heures les plus chaudes de la journée). Ceci est dû à la convection dans la lame d'air non confinée.

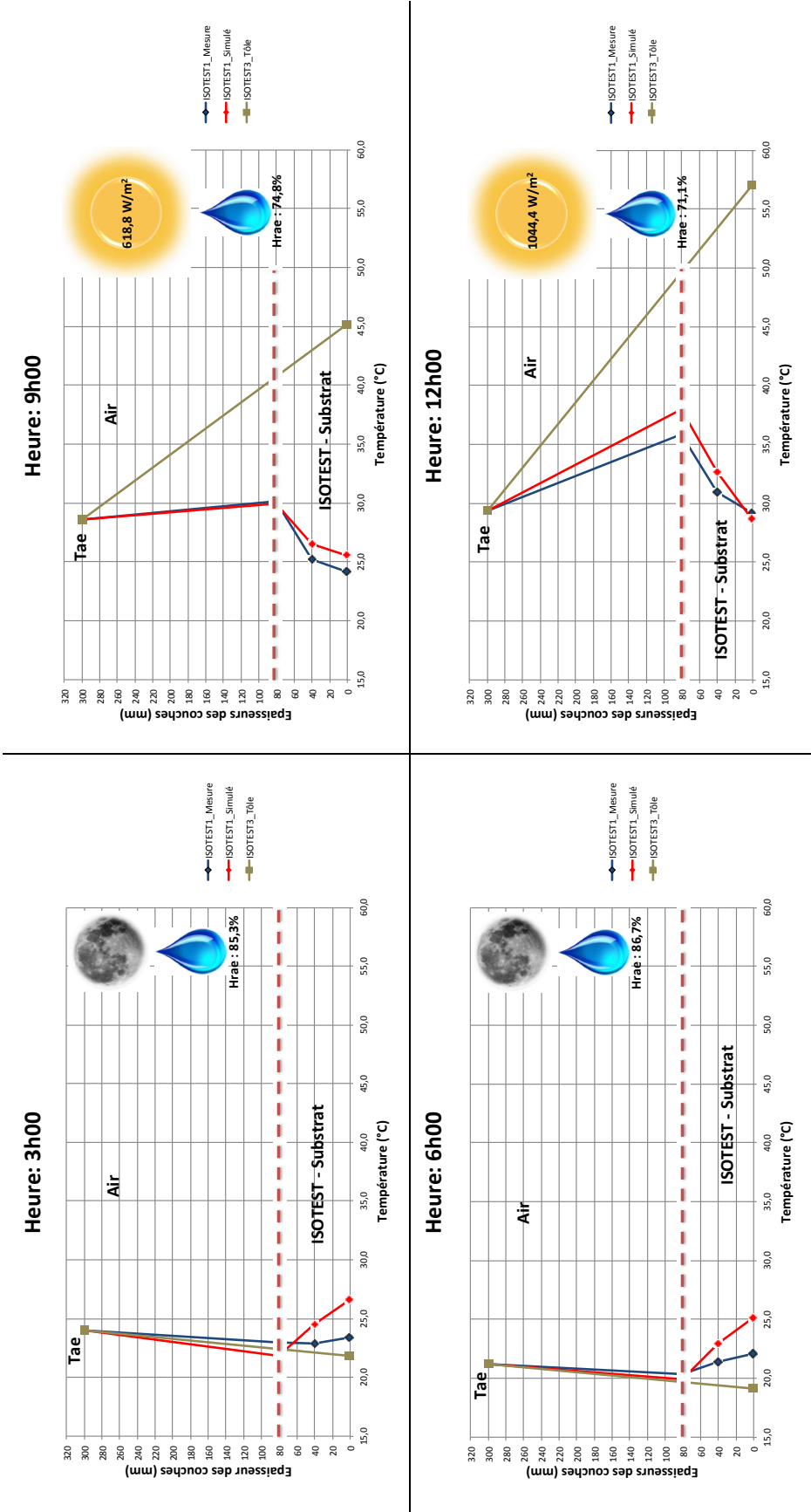


Figure 7.13 – Comparaison horaire des profils de températures mesurées et simulées pour l'ISOTEST 1 : substrat.

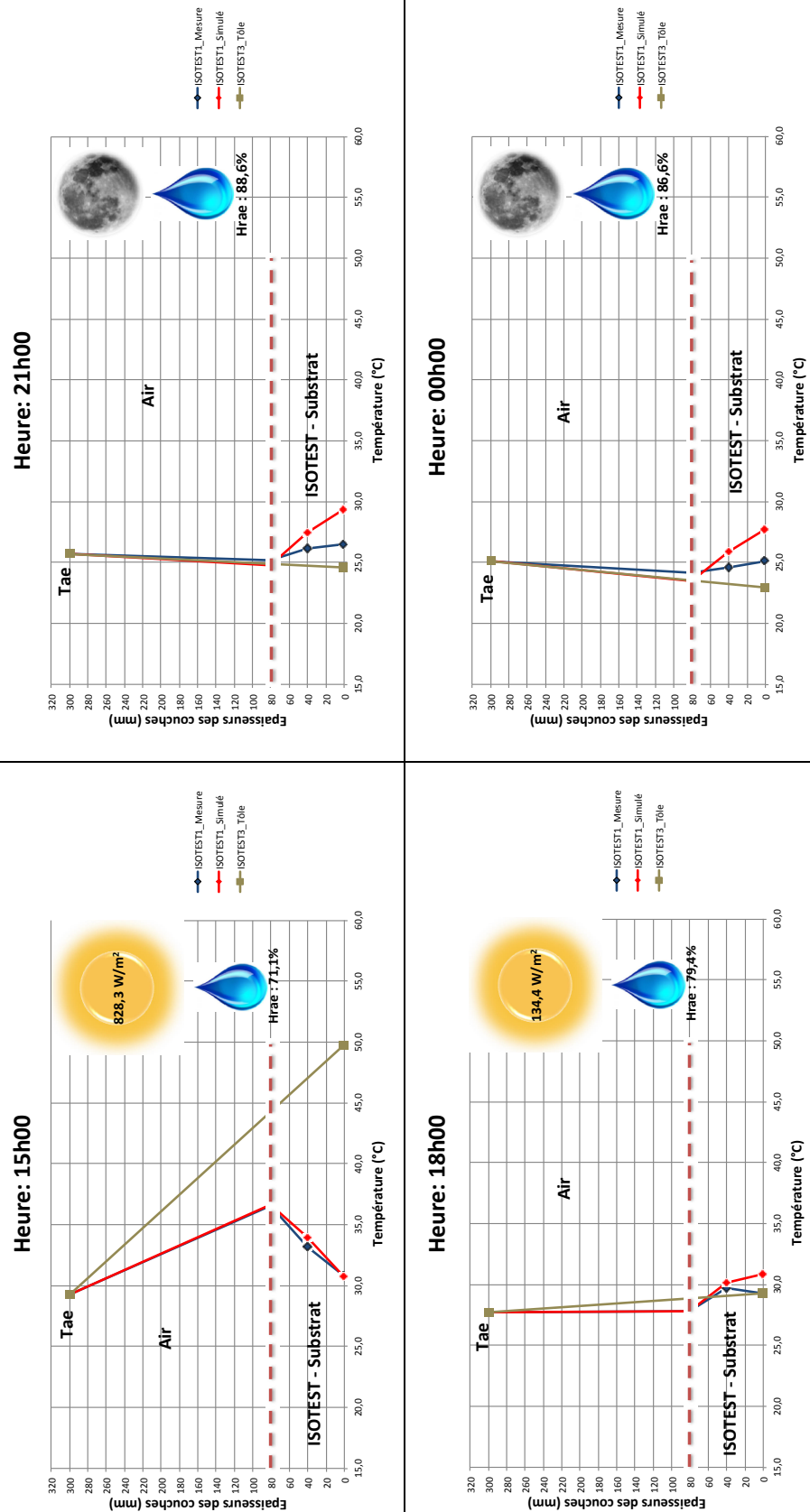


Figure 7.14 – Comparaison horaire des profils de températures mesurées et simulées pour l'ISOTEST 1 : substrat (suite) .

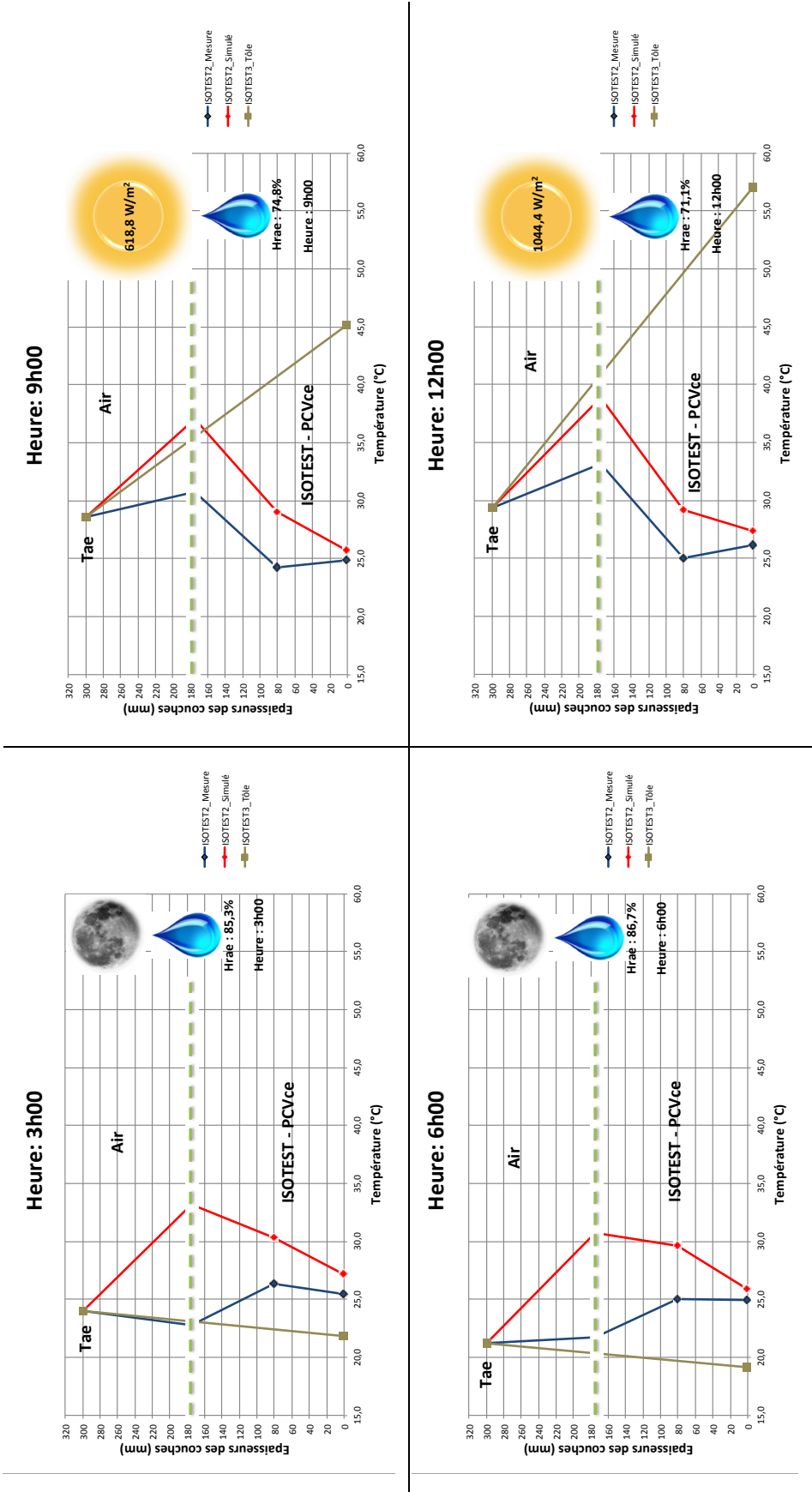


Figure 7.15 – Comparaison horaire des profils de températures mesurées et simulées pour l'ISOTEST 2 : PCVce^{T_h}.

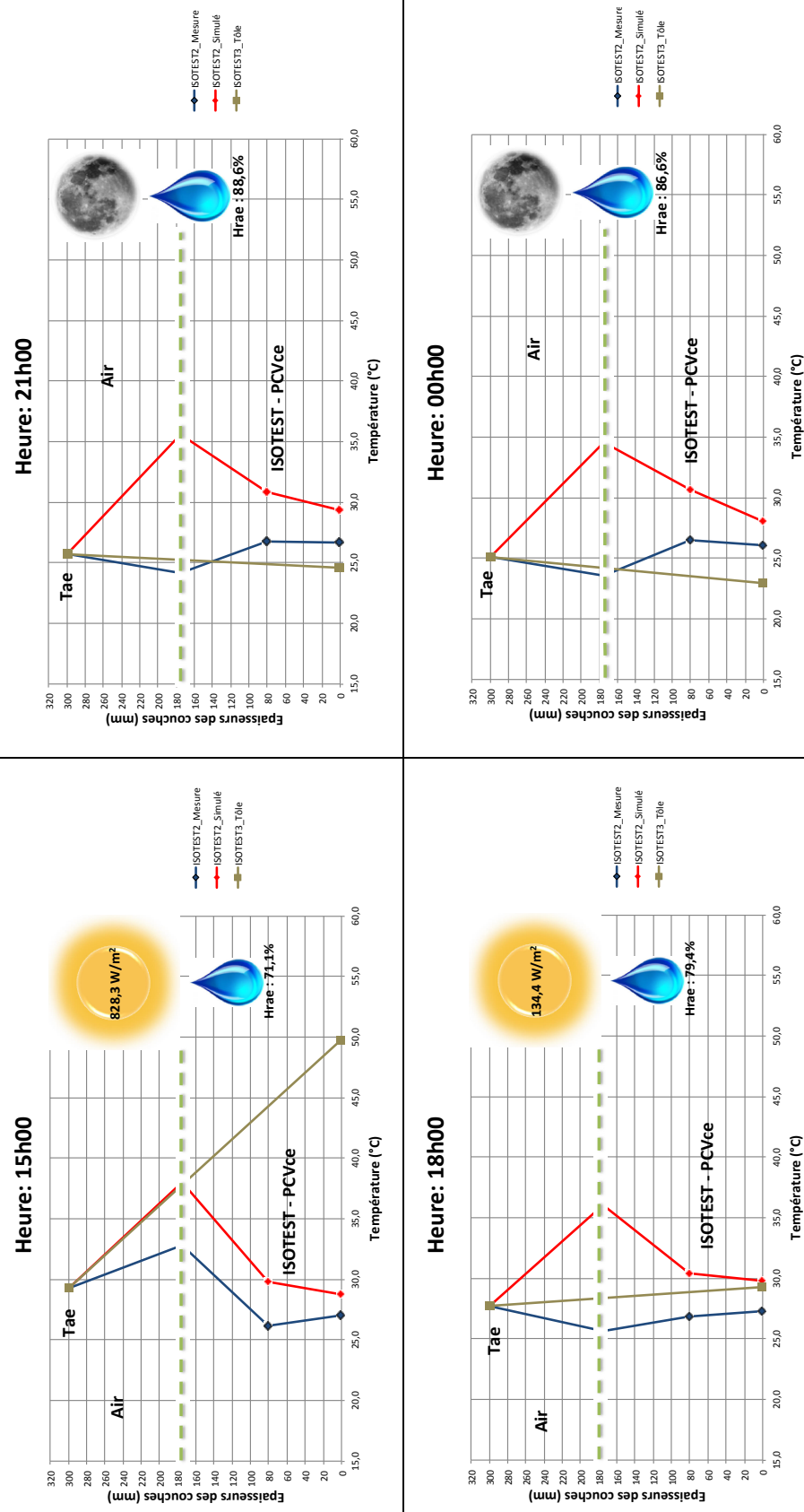


Figure 7.16 – Comparaison horaire des profils de températures mesurées et simulées pour l'ISOTEST 2 : PCV^{T_h}_{ce} (suite).

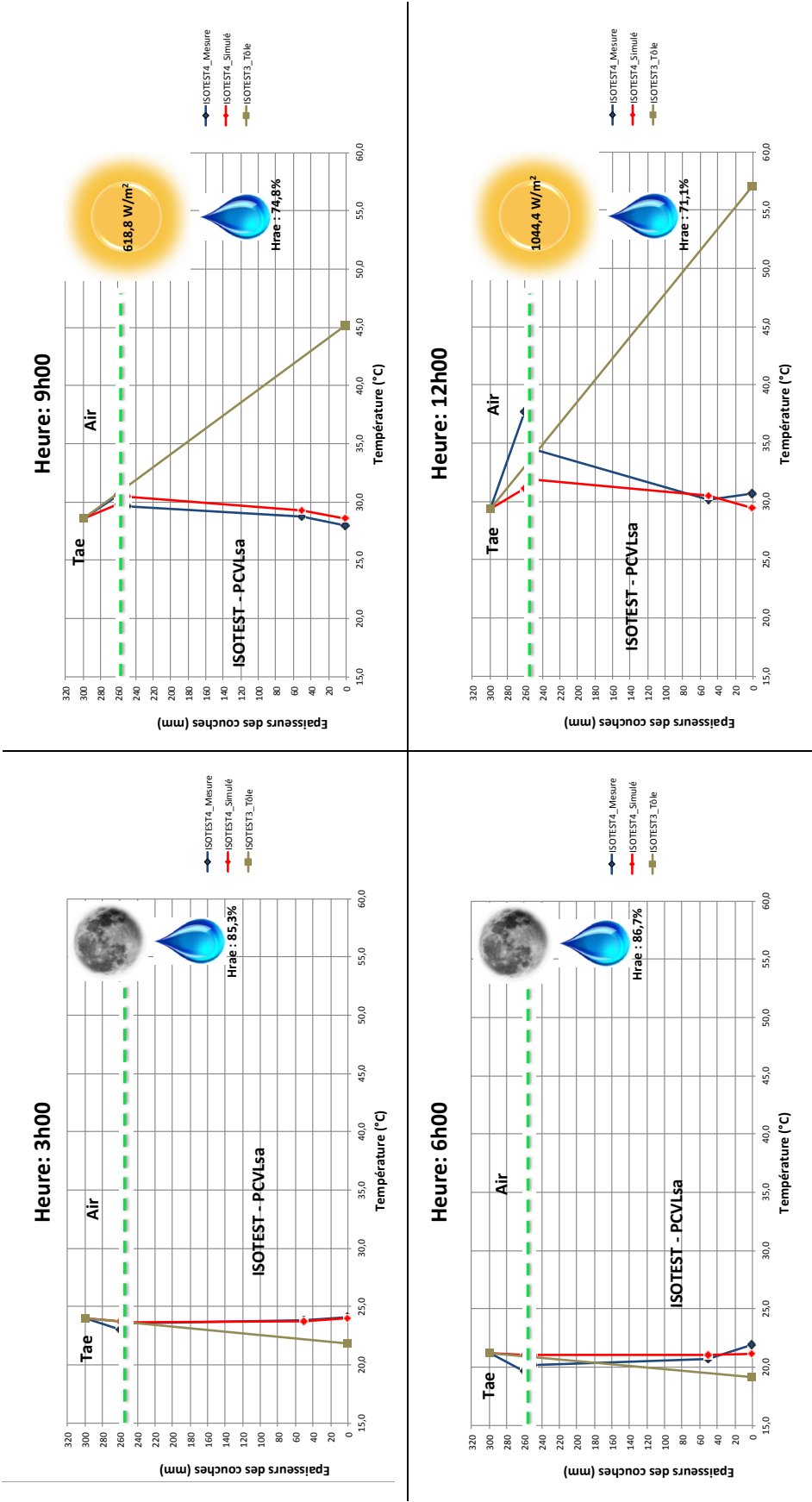


Figure 7.17 – Comparaison horaire des profils de températures mesurées et simulées pour l'ISOTEST 4 : $PCV_{Lsa}^{T_h}$.

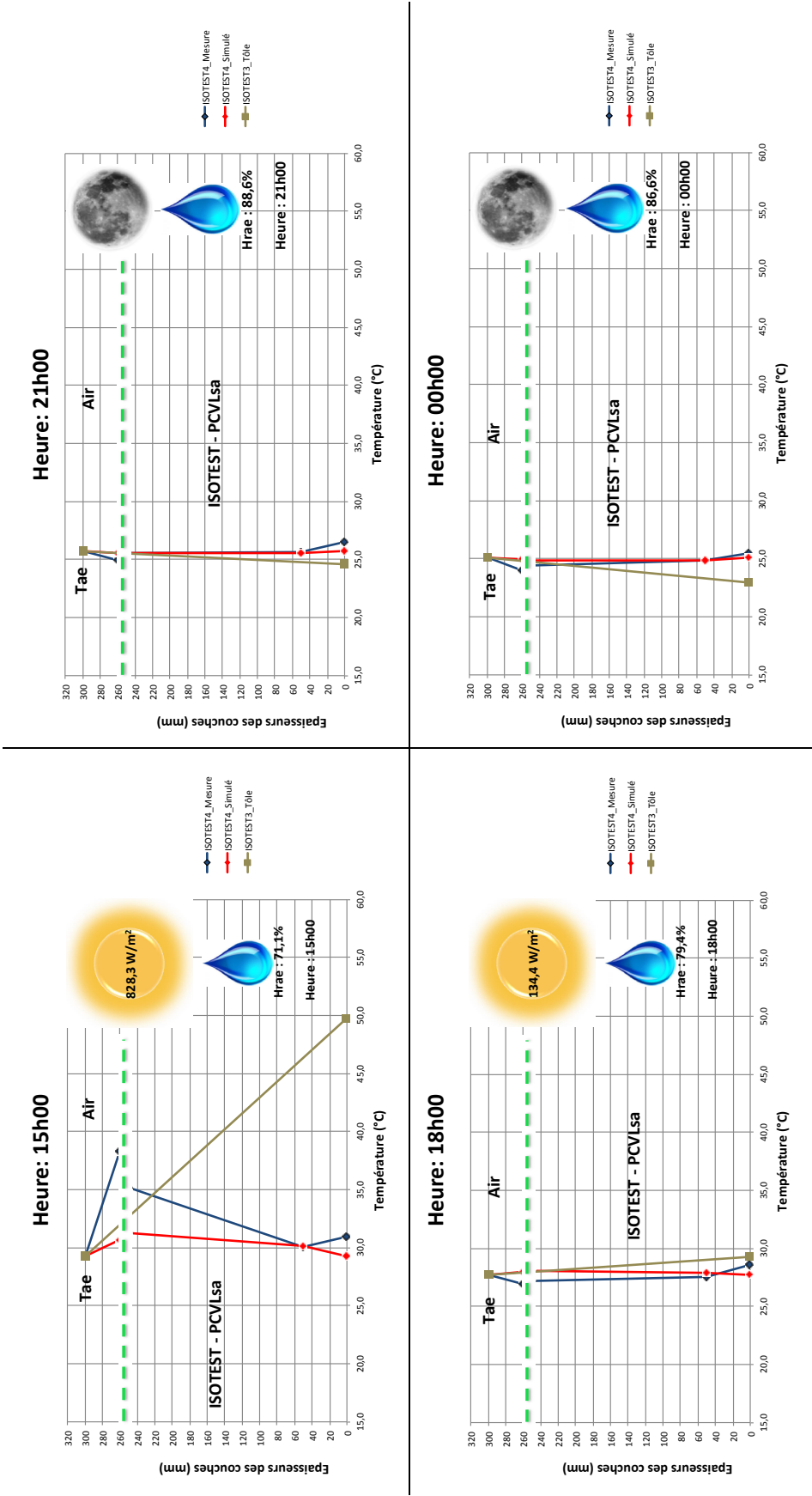


Figure 7.18 – Comparaison horaire des profils de températures mesurées et simulées pour l'ISOTEST 4 : PCV/L_{sa} (suite).

7.4 Perspectives

Suite aux éléments de validation présentés, et pour les conditions météorologiques testées, il s'avère que chacun des modèles, vis-à-vis de leurs réalités physiques respectives, considère l'ensemble des phénomènes physiques nécessaires (prépondérants). Toutefois, au regard des erreurs associées à la température de tôle de chacun des ISOTEST, il est nécessaire d'utiliser une approche basée sur l'analyse de sensibilité paramétrique et l'optimisation paramétrique afin d'augmenter la précision des modèles implémentés [MIRANVILLE, 2002]. Plus globalement, ces actions font partie de l'étape « validation et optimisation » définie dans la méthodologie générale (Cf. section 2.2 du chapitre II). À noter que ces deux outils, présents dans ISOLAB, sont couplés à PCVBÂT et fonctionnels (validés).

Plus spécifiquement, divers phénomènes sont à affiner. Ceci est fait *via* une redéfinition de leurs paramètres, que ceux-ci soient relatifs aux matériaux utilisés ou bien aux conditions d'exploitations, afin qu'ils correspondent plus spécifiquement aux cas d'études. Il s'agit des phénomènes suivants :

- les transferts convectifs externes en surface des cas d'études « tôle », « substrat », PCV_{ce}^{Th} , ainsi qu'en surface de la tôle de la PCV_{Lsa}^{Th} et dans sa canopée ;
- les transferts radiatifs en surface des cas d'études ;
- les propriétés thermophysiques du substrat et de la canopée ;
- l'évaporation dans le substrat ;
- la transpiration dans les canopées. L'optimisation paramétrique de ce phénomène caractéristique et prépondérant pourra être effectuée indépendamment, *via* une confrontation modèle/mesure des résistances stomatiques. Ces données étant accessibles *via* l'utilisation d'un poromètre¹².

De plus, l'augmentation de la précision du modèle et de la connaissance des erreurs associées à chacun des phénomènes permettra de confirmer à posteriori les choix et hypothèses faits lors de la modélisation. Il s'agit par exemple de la considération du gazon comme une couche homogène uniforme, ou bien de la considération de la liane comme une couche (un milieu mixe) et non comme une condition aux limites, *etc.*

Enfin, parmi les actions prépondérantes à effectuer en perspective, se trouve la définition d'un modèle pour le paramètre β (eq. 3.31), dans l'optique de généraliser le modèle de transmittivité solaire de la canopée (utilisé pour la PCV_{Lsa}^{Th}) ; car celui-ci est actuellement issu d'un post-traitement de données expérimentales.

12. Le poromètre nous avait gracieusement été prêté par le Dr LÉCHAUDÉL du CIRAD.

Section 8

Synthèse

L'objectif de ce chapitre est de proposer une modélisation des PCV dans les conditions climatiques de l'île de La Réunion et adaptée à ses contraintes architecturales. Pour ce faire, la modélisation est basée sur les descriptions des PCV expérimentées (présentées au chapitre III). Afin de permettre une validation par étape, leurs références respectives ont également été modélisées (elles possèdent moins de couches, donc moins de phénomènes). Quatre systèmes ont donc été étudiés : tôle, substrat, PCV_{ce}^{Th} (gazon) et PCV_{lsa}^{Th} (liane).

La modélisation unidimensionnelle (perpendiculaire à la paroi) est basée sur la simplification des bilans de flux énergétiques et massiques effectués sur les couches matérielles, considérées homogènes, composant les systèmes d'étude. Elle prend en compte les champs thermique, hydrique et hygrique dont le couplage est principalement fait *via* les phénomènes de changement d'état (évaporation, transpiration et condensation), ainsi que *via* l'évolution des propriétés thermophysiques des matériaux. Dans une approche semi-détaillée, les couches des PCV sont discrétisées avec un faible nombre de nœuds. Ils sont par ailleurs intégrés à un code nodal de physique du bâtiment thermo-hygro-aéraulique (ISOLAB), le couplage est effectué *via* les conditions aux limites.

À noter que ce modèle se distingue des modèles existants par la considération couplée des transferts thermique, hydrique et hygrique, mais aussi par une approche dynamique des précipitations. Enfin, c'est le premier modèle créé qui soit spécifiquement adapté à l'île de la Réunion.

Afin de générer les modèles de PCV, un code de calcul dédié a été créé : PcvBÂT. Autonome, PcvBÂT est fort de 28 000 lignes de code, incluant l'interfaçage (avec gestion dynamique des champs), les sous-modèles implémentés et la création du fichier de modèle. Il permet de décrire les PCV (géométrie, conception), de choisir les phénomènes (thermique, hydrique et hygrique) modélisés ainsi que les modèles associés et leurs paramètres pour chacune des couches présentes et de leurs interfaces. Suite à cette étape interactive, un fichier est généré automatiquement. Celui-ci contient le modèle spécifique dédié à la PCV décrite et qui sera interprété à chaque itération de la boucle de résolution par ISOLAB. Aux vues du nombre de sous-modèles utilisés, cette approche permet, entre autres, de simplifier la vérification du modèle, son archivage et une interprétation plus rapide.

Inscrit dans une logique de développement de la recherche sur les parois complexes au sein du laboratoire PIMENT, PcvBÂT est intégré sous forme de module à la plateforme d'expérimentation numérique ISOLAB, qui est développée par le groupe thématique physique du bâtiment (PHYBÂT) sous la direction du PR. MIRANVILLE. Lors de cette intégration, les systèmes matriciels thermique, hydrique et hygrique sont couplés à ceux générés par ISOLAB et actualisés à chaque itération. Afin de permettre l'interaction entre ces champs un algorithme de résolution a été développé, intégrant une gestion de l'apparition de solutions

oscillantes n -stables lors de la procédure de convergence itérative pour chacun des pas de temps (algorithme également utilisé pour accélérer la convergence). Au cours des travaux de modélisation des outils connexes ont également été implémentés sous forme de modules, il s'agit par exemple de la création automatisée d'une version exécutable d'ISOLAB (en version graphique ou console pour appel par l'outil GENOPT) ou de son archivage, de la généralisation des capacités de stockage des structures de données (sous forme de fichier texte), de la simplification de la navigation sur les interfaces graphiques (gestion thématique des champs), *etc.*

Suite à l'implémentation, une procédure de vérification du couplage PCVBÂT/ISOLAB a été opérée. Elle est concluante : l'erreur est de l'ordre de la précision machine. Fort de ce résultat les simulations ont pu être effectuées et comparées aux données expérimentales dans le cadre de la présentation d'éléments de comparaison modèle/mesure. L'objectif étant la prédiction de la température sous la paroi, le critère observé est la température sous la tôle. Considérant la dynamique des courbes et leurs erreurs, il ressort que chacun des modèles considère l'ensemble des phénomènes physiques prépondérants. Toutefois, une procédure de validation est nécessaire. Ces éléments de validation ouvrent donc la voie à des perspectives telles que l'analyse de sensibilité et l'optimisation paramétrique en vue de réduire l'erreur issue du choix des paramètres et ainsi accéder à l'erreur associée au modèle (inhérente à son approche, ses hypothèses et concepts). Celle-ci permettant *in fine* de vérifier la précision de la prédiction afin qu'elle soit en adéquation avec celle d'un code nodal de physique du bâtiment.

Chapitre V

Synthèse Générale

Chap.
V

*« J'aimerais mieux découvrir une
seule chose, même petite, que de
philosopher sur les grands
problèmes sans rien découvrir du
tout »*

GALILEO GALILEI

Synthèse Générale

Conclusion Générale

Cette thèse a eu pour objectif l'étude des parois complexes végétalisées intégrées au bâtiment. À cette fin, la problématique posée était composée de trois questions, dont voici les réponses synthétiques :

Question 1 :

« *Les parois végétalisées sont-elles adaptées au climat réunionnais ?* »

Afin d'apporter un élément de réponse, une expérimentation, à échelle réduite et en conditions réelles, a été conduite sur le site de l'IUT de Saint-Pierre de La Réunion. Sur une base de données de 18 mois, l'analyse d'une période de 12 jours, représentative des journées les plus défavorables pour le confort thermique (classe 1 : forte irradiation, faible vitesse de vent et une humidité relative importante, mais non saturée), permet d'apporter des éléments de réponse. Il s'avère que la présence d'une PCV extensive (PCV_{ce}^{Te}) a permis une diminution de l'amplitude des flux thermiques (x4) et des températures (x3,1) en face interne de la paroi.

Par conséquent, la réponse est affirmative : les PCV peuvent être adaptées au climat Réunionnais. Toutefois, considérant la multitude de microclimats (allant de tropical humide à tempéré), il est nécessaire d'adapter sa composition aux conditions locales.

Question 2 : « *Quelle solution technique mettre en œuvre afin d'adapter les parois végétalisées au mode constructif réunionnais ?* »

D'un point de vue constructif, la grande majorité du parc Réunionnais est composé de bâtis possédant une structure légère associée à une couverture en tôle d'acier. Afin d'adapter les PCV à ces spécificités, une PCV extensive composée de gazon des Mascareignes et de scories (la PCV_{ce}^{Th}) a été instrumentée sur un bâti à échelle 1/3 (nécessitant des développements métrologiques). Cette conception donne d'excellents résultats : réduction circadienne de 75,1% des gains en température de plafond. Toutefois, elle possède une masse jugée trop importante.

Une seconde approche a donc été employée : l'utilisation d'une végétation ligneuse et d'une lame d'air. L'absence de terminologie pour cette approche dans la littérature, nous a conduit à définir une nomenclature associée à cette description (la PCV_{La}^{Th}) et plus généralement aux parois végétalisées : la notion de PCV. Cette seconde conception donne également de bons résultats : réduction circadienne de 55,2% des gains en température de plafond.

L'impact thermique de la PCV_{Lsa}^{Th} est donc extrêmement positif et sa faible charge pondérale permet une exploitation sur la totalité du parc immobilier Réunionnais. Se faisant, elle a la capacité d'ouvrir un nouveau secteur d'activité : les PCV sur structures légères (exportables dans toute la ceinture tropicale).

Par ailleurs, les résultats de ces travaux concordent avec l'actualité législative. En effet, un amendement du projet de loi dit « organique » portant sur la biodiversité en milieux urbain et périurbain, voté à l'Assemblée Nationale le 24 mars 2015, favorise la végétalisation des centres commerciaux (L. 111-6-1 du code de l'urbanisme).

Enfin, il est à noter que cette approche innovante (la PCV_{Lsa}^{Th}) fait l'objet d'une procédure de dépôt de brevet.

Question 3 : « *Comment prévoir de façon fiable et reproductible le comportement et la performance énergétique des parois végétalisées ?* »

Afin d'apporter des éléments de réponse à cette question, une étude numérique a été initiée. La modélisation des PCV n'est pas chose aisée. En effet, les PCV sont à l'interface de plusieurs disciplines, dont les nombreux phénomènes sont généralement couplés et définissent pour certains le caractère « vivant » de la paroi étudiée. Durant ces travaux, la prédiction thermique a été abordée considérant les champs thermique, hydrique et hygrique, dont les interactions au niveau de la canopée sont typiquement liées aux processus biologiques de la plante (ouverture des stomates).

Dans l'optique de permettre leur modélisation, un code de calcul générique a été créé (PcvBât). Implémenté sous forme de module, il est couplé à ISOLAB afin de faciliter son utilisation et pouvoir le tester sur un code de bâtiment validé.

Les éléments de validation modèles/mesures présentés, pour les conditions météorologiques testées (journées type de classe 1), permettent de considérer que les modèles mis en œuvre pour les quatre cas d'études (tôle, substrat, PCV_{ce}^{Th} et PCV_{Lsa}^{Th}) possèdent des tendances et dynamiques correctes.

En conclusion, d'un point de vue territorial, les PCV représentent une formidable opportunité pour l'île de La Réunion (entre autres). En effet, qu'ils soient thermiques (réduction de la surchauffe des bâtiments et de l'effet d'îlot urbain), mais aussi écologiques, hydriques, acoustiques (*etc.*), les multiples atouts d'une PCV, répondent à d'abondantes problématiques urbaines actuelles (issues de la révolution industrielle).

D'un point de vue scientifique, considérant le nombre et la complexité des phénomènes, de multiples pistes d'améliorations existent ; elles offrent de nombreuses perspectives, tant sur le plan expérimental que de la modélisation.

Synthèse Générale

Perspectives

Dans la continuité des travaux présentés, divers axes de recherches sont nécessaires ou peuvent être envisagés. Qu'ils soient associés à la modélisation ou à l'expérimentation, en voici les plus importants :

— *Modélisation* —

1. *Procédure de validation* : Il est nécessaire d'effectuer une validation des modèles sur une base de données regroupant les configurations météorologiques les plus probables. Au cours de cette procédure, l'utilisation de l'analyse de sensibilité permet de définir les paramètres nécessitant une optimisation. En dehors des paramètres liés aux phénomènes environnementaux (principalement irradiation et convection), les paramètres qui semblent nécessiter une optimisation, par ordre d'influence, sont le LAI ainsi que les résistances aérodynamiques et stomatiques, puis chacun des paramètres thermophysiques.
2. *Cas applicatif* : Suite à la validation, un cas applicatif sera étudié afin de permettre de quantifier l'impact associé à l'usage des quatre cas d'études sur un habitat type, et ainsi obtenir les indicateurs associés à leurs usages (les gains énergétiques annuels, confort, *etc.*).
3. *Adapter la précision* : Diverses actions peuvent être entreprises en vue d'affiner l'adéquation du modèle existant vis-à-vis de la précision souhaitée :
 - (a) Améliorer la célérité du modèle via l'utilisation des techniques de réduction dans le but de conserver uniquement la complexité du modèle nécessaire ;
 - (b) Modéliser de manière simplifiée l'impact de la répartition et de l'orientation des feuilles dans la canopée sur la transmittivité de celle-ci ;
 - (c) Remplacer le modèle de tracé de rayon (nécessite un temps de calcul important) par un modèle de BEER-LAMBERT dont les paramètres seraient fonction de la description de la canopée.
4. *Modèle simplifié* : Développer un modèle simplifié du complexe de toiture. En fonction des résultats de l'analyse de sensibilité les deux finalités suivantes peuvent être considérées :
 - (a) Proposer une simplification du complexe de toiture en une paroi multicouche ;
 - (b) Exporter le modèle sous forme d'une règle experte pour les acteurs sociaux-économiques.
5. *CODYRUN* : Intégration du modèle à CODYRUN en vue de sa diffusion (code du laboratoire écrit en C et utilisé par les acteurs sociaux-économiques) ;

6. *Aide à la décision* : Création d'un code générique d'aide à la décision basée sur le couplage ISOLAB/PCVBÂT. Il permettrait de définir pour un bâtiment donné soumis à des conditions météorologiques définies, le choix le plus adapté pour la composition de la PCV : la végétation (LAI, épaisseur de canopée, *etc.*), le substrat (présence, type, épaisseur, *etc.*), et ceci au regard d'un ou plusieurs critères sélectionnés (température de plafond, confort, consommation énergétique, *etc.*).

— *Expérimentation* —

1. *Choix végétation* : Les espèces végétales testées ont initialement été choisies sur les conseils avisés d'un professionnel quant aux conditions climatiques et sur l'adéquation des propriétés physiques de la plante avec notre cahier de charges. Fort de l'expérience acquise, et de notre compréhension plus fine des phénomènes en présence, nous sommes maintenant en mesure d'affiner le cahier des charges et de choisir une végétation plus adaptée aux besoins durant une étape de sélection expérimentale *in situ* (LAI important, forte compacité, *etc.*) ;
2. *Échelle 1* : L'expérimentation d'une PCV à échelle unité est un objectif important afin de tester les solutions préconisées par le modèle et affiner sa validation ;
3. *Étude mécanique* : Il est nécessaire de compléter l'étude thermique des PCV avec une étude mécanique, portant sur la tenue aux cyclones, les impacts sur la corrosion de la tôle, les méthodes de fixation, *etc.* ;
4. *Couplages des solutions* : Dans l'optique d'améliorer la qualité de l'impact thermique, et au regard de la charge pondérale, un couplage avec des matériaux possédant des propriétés complémentaires est une piste intéressante. Le couplage avec les matériaux minces réfléchissants a été mis en exergue durant cette étude. Mais d'autres solutions de couplage (possiblement multiples) existent, notamment avec les parois complexes étudiées au sein du laboratoire : les panneaux photovoltaïques, les matériaux à changement de phase, *etc.* ;
5. *Problématiques connexes* : Enfin, il est possible d'ouvrir le champ d'étude des PCV à d'autres thématiques présentes au sein du laboratoire, en particulier :
 - (a) L'éclairagisme, via la transmittance de la canopée lorsqu'elle est utilisée comme protection végétale sur une pergola ou au-dessus d'une verrière, *etc.*
Nota : l'aspect chromatique influe uniquement sur les paramètres du modèle de tracé de rayon, qui est déjà mis en œuvre ;
 - (b) La pollution dans le bâti, via les échanges gazeux induits par la présence d'une PCV positionnée dans l'enceinte d'un bâtiment (mur, plafond, colonne végétale, *etc.*).
Nota : les principaux bilans de concentration sont considérés via le phénomène de transpiration, celui-ci est implémenté dans les modèles de PCV présentés.

Bibliographie et Tables

*« Ce qui se conçoit bien s'énonce
clairement et les mots pour le dire
viennent aisément »*

N. BOILEAU

Sommaire des Bibliographies et Tables

Bibliographie	v
Table des matières générale	xvii
Nomenclature	xxvii
Lettres Latines	xxvii
Lettres Grecs	xxix
Indices	xxix
Exposants	xxx
Symboles	xxx
Acronymes	xxx
Liste des Tableaux	xxxiii
Liste des Figures	xxxvii

Bibliographie et Tables

Bibliographie

- ADIVET , UNEP , CSFE et SNPPA . *Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées*, 2 édition, novembre 2007.
- ALEXANDRI E. et JONES P. Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment : Comparison with experimental results. *Building and Environment*, 42(8) :2835 – 2849, 2007. ISSN 0360-1323. doi : 10.1016/j.buildenv.2006.07.004. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V23-4N14D36-1/2/17bf692d026345ec0892373e0df14faf>.
- ALLARD F. *Natural ventilation in buildings : a design handbook*. James and James, 1998.
- ALLARD F., INARD C. et ROLDAN A. Étude comparative de différentes méthodes de modélisation des échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde dans une cellule d'habitation. Rapport technique 442, ITBTP, 1986.
- ALLEN R., PEREIRA L., RAES D. et SMITH M. Crop evapotranspiration. In *Guidelines for computing crop water requirements — FAO irrigation and drainage*. FAO—Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998. paper 56.
- ALLEN R. G., PEREIRA L. S., HOWELL T. A. et JENSEN M. E. Evapotranspiration information reporting : I. Factors governing measurement accuracy. *AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT*, 98(6) :899–920, APR 2011. ISSN 0378-3774. doi : {10.1016/j.agwat.2010.12.015}.
- ALUWIHARE S. et WATANABE K. Measurement of evaporation on bare soil and estimating surface resistance. *Journal of Environmental Engineering*, 129(12) :1157–1168, 2003.
- ANDERSON D., VERMA S. et ROSENBERG N. Eddy correlations measurements of co₂, latent heat and sensible heat fluxes over a crop surface. *Boundary Layer Meteorology*, 29 :263–272, 1984.
- ANDERSON E., BAI Z., BISCHOF C., BLACKFORD S., DEMMEL J., DONGARRA J., CROZ J. D., GREENBAUM A., HAMMARLING S., MCKENNEY A. et SORENSEN D. *LAPACK User's Guide*. SIAM, Philadelphia,, third edition, 1999. URL http://www.netlib.org/lapack/lug/lapack_lug.html.
- ARER . Bilan Énergétique de l'île de la réunion 2011. Technical report, ARER, 2012. URL <http://www.arer.org/Conseil-d-orientation-de-l-oer-du.html>. Édition 2012.
- ARER . Site internet, 2014. URL <http://www.arer.org/>.
- ASSEMBLÉE NATIONALE . Loi organique « biodiversité en milieux urbain et péri-urbain (section 6 bis), 24 mars 2015. Projet de loi. [http ://www.assemblee-nationale.fr/14/dossiers/biodiversite.asp](http://www.assemblee-nationale.fr/14/dossiers/biodiversite.asp), Visité le 28/03/2015.

- BARRADAS V., TEJEDA-MARTINEZ A. et JÁUREGUI E. Energy balance measurements in a suburban vegetated area in Mexico city. *Atmospheric Environment*, 33 :4109–4113, 1999.
- BASS B. et BASKARAN B. A. Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas. Technical Report Report no. NRCC-46737, NRC-CNRC (National Research Council Canada, Institute for Research in Construction.), Ottawa (Canada), September 2003. URL <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc46737/nrcc46737.pdf>.
- BASS B. Estimating the benefits of green roofs and walls for an urban area : Aggregate benefits. Technical report, Environmental Adaptation Research Group, Environment Canada, 1999.
- BELL H. et SPOLEK G. Measured energy performance of green roofs. In *Seventh Annual International Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference*, juin 2009.
- BERARDI U., GHAFFARIANHOSEINI A. et GHAFFARIANHOSEINI A. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115(0) :411 – 428, 2014. ISSN 0306-2619. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913008775>.
- BERGES B. *Analyse du comportement conductif de l'enveloppe d'un bâtiment : recherche de modèles de transfert pour un flux monodimensionnel au travers des parois opaques*. Thèse de doctorat, Université de Nice, France, 1986. 296 p.
- BERGHAGE R., JARRETT A., BEATTIE D., KELLEY K., HUSAIN S., REZAI F., LONG B., NEGASSI A., CAMERON R. et HUNT W. Quantifying evaporation and transpiration water losses from green roofs and green roof media capacity for neutralizing acid rain. Technical report, National Decentralized Water Resources Capacity Development Project, avril 2007.
- BERRETTA C., POË S. et STOVIN V. Reprint of “moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods : The influence of vegetation and substrate characteristics”. *Journal of Hydrology*, xxx :xx–xx, 2014. ISSN 0022-1694. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.001>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169414002595>. Publication en cours.
- BEST M. A model to predict surface temperatures. *Boundary-Layer Meteorology*, 88 :279–306, 1998.
- BIGOT D., MIRANVILLE F., FAKRA A. et BOYER H. 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(9) :1117–1126, 2009.
- BIGOT D. *Contribution à l'étude du couplage énergétique enveloppe/système dans le cas de parois complexes photovoltaïques (PC - PV)*. Thèse de doctorat, spécialité : Physique du bâtiment, Université de La Réunion, France, Novembre 2011. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00766755v2>.
- BIGOT D., MIRANVILLE F., INGAR I., FAKRA A. H., GUICHARD S. et BOYER H. Thermal performance of photovoltaic systems integrated in buildings. In INTECH, editor, *Solar Collectors and Panels, Theory and Applications, Reccab Manyala (Ed.)*, pages 405–411. InTech, October 2010. ISBN 978-953-307-142-8. doi : 10.5772/10347. URL <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00767716>. Available from : <http://www.intechopen.com/books/solar-collectors-and-panels-theory-and-applications/thermal-performance-of-photovoltaic-systems-integrated-in-buildings->.
- BLANK L., VASL A., LEVY S., GRANT G., KADAS G., DAFNI A. et BLAUSTEIN L. Directions in green roof research : A bibliometric study. *Building and Environment*, 66 :23 – 28, 2013. ISSN 0360-1323. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.017>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313001224>.

- BOIVIN M.-A. Geld vom staat fur gurne dacher, 1992. DZ.
- BOSTYN F. Néolithique, 2014. URL <http://www.inrap.fr/>. Observé sur le site de l'Institut National de Recherche Archéologiques Préventives (INRAP) http://www.inrap.fr/archeologie-preventive/Ressources/Dossiers-multimedias/Chronologie/Chronologie-des-periodes-de-l-histoire-et-de-l-archeologie/p-12506-Periodes-version-texte-.htm?periode_id=7, Vu le 28 février 2014.
- BOYER H., MIRANVILLE F., BIGOT D., GUICHARD S., FAKRA A., JEAN A., INGAR I., CALOGINE D. et SOUBDHAN T. *Heat Transfer*, chapter Heat transfer in buildings, application to solar devices and architecture. InTech Ed, July 2011.
- BOYER H. *Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choisir multiple des modèles*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France, December 1993. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00757022>. Voir aussi Habilitation à Diriger les Recherches (1999).
- BOYER H. *Thermique et aéraulique des bâtiments : une contribution spécifique, sa validation et ses applications*. Habilitation à diriger des recherches, Université de la Réunion, décembre 1999. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00762910>.
- BRANGEON B. *Numerical investigation of natural ventilation in open cavities through a Large Eddy Simulation for the passive cooling of buildings*. Theses de doctorat, Université de la Réunion, October 2012. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00763390>.
- BRETON J. *Modélisation thermique et simulation numérique en régime variable de parois à lames d'air insolée et/ou ventilée – intégration dans un code de calcul de charges thermiques de bâtiments*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 1986. 362 p.
- BROOKS R. et COREY A. *Hydraulic properties in porous media*. Fort Collins, 1964. 27pp.
- BURBA G. et ANDERSON D. A brief practical guide to eddy covariance flux measurements : Principles and workflow examples for scientific and industrial applications. Technical Report Version 1.0.1, LI-COR Biosciences, 2010.
- CACCAVELLI D. *Modélisation du comportement thermique des bâtiments multizones : adaptation à un processus de conception*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 1988. 477 p.
- CAMPBELL . Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36 :317–321, 1986.
- CAMPBELL G. et NORMAN J. *An introduction to environmental biophysics*. Springer-Verlag, New York, 2 edition, 1998.
- CARLSON T. N. et RIZILEY D. A. On the relation between ndvi, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing Environnement*, 62 :241–252, 1997.
- CASTELLOTTI F. *Studio sperimentale degli effetti energetici di un green roof sugli edifici*. PhD thesis, Università degli studi di Padova, Dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali, 2003.
- CHAPMAN A. J. *Heat transfer*. Macmillan Publishing Compagny, New York, 4 edition, 1974. ISBN 0-02-321470-8. 608 p.
- CHRISTIAN J. et PETRIE T. Sustainable roofs with real energy savings. In *Sustainable low-Slope Roofing Workshop held the Pollard Auditorium*, Oak Ridge, Tennessee, 1996. October 9-10.

- COHEN S. et FUCHS M. The distribution of leaf area, radiation, photosynthesis and transpiration in a shamouti orange hedgerow orchard. part i. leaf area and radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 40, 1987.
- CONNELLY M. et LIU K. K. Y. Green roof research in british columbia - an overview. In *Greening Rooftops for Sustainable Communities*, pages 1–17, Washington, D.C., mai 2005. URL <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc48203/nrcc48203.pdf>.
- CURTIS O. Leaf temperatures and the cooling of leaves by radiation. *Plant Physiology*, 11(2) : 343–364, 1936.
- CURTIS W. *Le Corbusier : ideas and forms*. Phaidon, 1994. ISBN 9780714827902. URL http://books.google.com/books?id=KnF4rGWau_gC.
- DAMOUR G. *Bases théoriques et approches expérimentales de la modélisation des effets de la contrainte hydrique sur les échanges gazeux foliaires du manguier et du litchi*. Thèse de doctorat, spécialité : Biologie végétale, Université de La Réunion, France, 2008.
- DAMOUR G., SIMONNEAU T., COCHARD H. et URBAN L. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant, Cell and Environment*, 33, 2010. doi : 10.1111/j.1365-3040.2010.02181.x.
- DELORME E. *Garden pavilions and the 18th century French court*. Antique Collectors' Club, 1996. ISBN 9781851491896. URL <http://books.google.com/books?id=9542AQAIAAJ>.
- DENARDO J. Green roof mitigation of stormwater and energy usage. Master's thesis, Dept. of Horticulture, Pennsylvania State University, State College, PA, 2003.
- DJEDJIG R., OULDBOUKHITINE S., BELARBI R. et BOZONNETET E. Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39 :752–761, 2012.
- DJEDJIG R., BOZONNET E. et BELARBI R. Integration of a green envelope model in a transient building simulation program and experimental comparison. In *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, pages 47–53, Chambéry, France, August 26-28 2013. BS2013.
- DONNELLY M. *Architecture in the Scandinavian Countries*. Gardens of Pompeii, Herculaneum & the Villas Destroyed by Ve. The MIT Press, Cambridge, MA, 1992. ISBN 9780262041188. URL <http://books.google.com/books?id=0mBoAAAAAAAJ>.
- D'ORAZIO C., CIANFRINI C. et CORCIONE M. Effects of vegetation on roof shielding on indoor temperatures. *Heat and Technology*, 16(2) :85–90, 1998.
- DTU 43.1 . *Étanchéité des toitures-terrasses et toitures inclinées avec éléments porteurs en maçonnerie en climat de plaine*. Ref : NF P 84-204, novembre 2004.
- FANG C.-F. Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops. *Energy and Buildings*, 40(6) :1048 – 1052, 2008. ISSN 0378-7788. doi : 10.1016/j.enbuild.2007.06.007. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-4PMT2W4-1/2/0632e2be57999304628bf8651a2b6005>.
- FARRAR L. Gardens of Italy and the western provinces of the Roman empire from the 4th century BC to the 4th century AD. *BAR International Series*, 650, 1996.
- FENG C., MENG Q. et ZHANG Y. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 42 :959–965, 2009.

- FENG C., MENG Q. et ZHANG Y. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 42(6) :959 – 965, 2010. ISSN 0378-7788. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.014>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810000149>.
- FEYNMAN R., LEIGHTON R., SANDS M. et GOTTLIEB M. *The Feynman lectures on physics*. The Feynman Lectures on Physics. Pearson/Addison-Wesley, 1963. ISBN 9780805390490. URL http://books.google.com/books?id=_6XvAAAAAAAJ.
- FFL . *Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-Roof Sites*. The Landscaping and Landscape Development Research Society, Germany, english edition, 2002. URL www.f-1-1.de/english.html.
- FLOWER W. Mexican motif : Casa Alvarado, 1937.
- GAFFIN S., ROSENZWEIG C., PARSHALL L., BEATTIE D., BERGHAGE R., O'KEEFFE G. et BRAMAN D. Energy balance modeling applied to a comparison of green and white roof cooling efficiency. In *Third Annual International Greening Rooftops for Sustainable Communities*, pages 15–27, Washington, D.C., 2005. Awards & Trade Show.
- GAFFIN S., ROSENZWEIG C., PARSHALL L., HILLEL D., EICHENBAUM-PIKSER J., GREENBAUM A., BLAKE R., BEATTIE D. et BERGHAGE R. Quantifying evaporative cooling from green roofs and comparison to other land surfaces. In *Fourth Annual International Greening Rooftops for Sustainable Communities*, pages 15–30, Boston, MA, 2006. Awards & Trade Show.
- GATES D. *Biophysical Ecology*. Springer-Verlag, New York, 1980a.
- GATES D. *Biophysical Ecology*. Springer advanced texts in life sciences. Springer-Verlag, 1980b. ISBN 9783540904144. URL http://books.google.com/books?id=KkFMnhP0t_kC.
- GEORGE L. Genoese renaissance villas : A typological introduction. *Journal of Garden History*, 3(4) :255–289, 1983.
- GOODE P. *The Oxford Companion to Gardens*, chapter entry for "Mexico", page 371. Oxford University Press, 1986.
- GRO . *The GRO Green Roof Code : Green Roof Code of Best Practice for the UK 2011*. Green Roof Organisation, 1 edition, January 2011.
- GUICHARD S. *Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changement de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale*. Thèse de doctorat, spécialité : Physique du bâtiment, Université de La Réunion, France, Mai 2013.
- GUICHARD S., MIRANVILLE F., BIGOT D. et BOYER H. A thermal model for phase change materials in a building roof for a tropical and humid climate : Model description and elements of validation. *Energy and Buildings*, 70(0) :71 – 80, 2014. ISSN 0378-7788. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.079>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813007962>.
- HE H. et JIM C. Simulation of thermodynamic transmission in green roof ecosystem. *Ecological Modelling*, 221(24) :2949 – 2958, 2010. ISSN 0304-3800. doi : 10.1016/j.ecolmodel.2010.09.002. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VBS-51498JK-2/2/be58b10fb1de4c23f2717506dcf8b50d>.
- HERBS W., JANKE B., MOHSENI O. et STEFAN H. Ground surface temperature simulation for different land covers. *Journal of Hydrology*, 356 :237–343, 2008.

- HIEU W. N., YOK T. P. et YU C. Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate. *Building and Environment*, 42(1) :25 – 54, 2007. ISSN 0360-1323. doi : 10.1016/j.buildenv.2005.07.030. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V23-4JKHP6H-1/2/a60b628ad6bf0902eb02c55da418ed88>.
- HILLEL D. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego, CA, 1998.
- HODO-ABALO S., BANA M. et ZEGHMATI B. Performance analysis of a planted roof as a passive cooling technique in hot-humid tropics. *Renewable Energy*, 39 :140 – 148, 2012.
- HODO-ABALO S. *Amélioration de la qualité environnementale du bâtiment : étude en zone climatique tropicale des transferts couples de chaleur et de masse dans un bâtiment en dalle végétalisée*. Thèse de doctorat, spécialité : Mécanique appliquée - phénomènes de transfert et énergétique, Université de Lomé, France, Janvier 2013.
- HOESCHELE K. et SCHMIDT H. Klimatische wirkung elner dachbegrunung. *Garten u Landschaft*, 87 :334-337, 1977.
- HOWE C. Model for thermal analysis of green roof performance. In *Six Annual International Greening Rooftops for Sustainable Communities*, Baltimore, MD, 2008. Awards & Trade Show.
- INARD C., MESLEM A. et DEPECKER P. Energy consumption and thermal confort in dwelling-cells : a zonal-model approach. *Building and environment*, 33(5) :279-291, 1998.
- INCROPERA F. P. et DEWITT D. P. *Introduction to heat transfer*. Wiley, New York, 3 edition, 1996. ISBN 0-471-30458-1. 801 p.
- ISO 9869-1994 . Isolation thermique - Éléments de construction - mesures in-situ de la résistance thermique et de la transmittance thermique. Norme ISO.
- JACOBSON M. *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- JASHEMSKI W. et JASHEMSKI S. *The Gardens of Pompeii : Herculaneum and the Villas Destroyed by Vesuvius*. Caratzas Bros., 1993. ISBN 9780892411252. URL <http://books.google.com/books?id=OmBoAAAAAAAJ>.
- JATON J.-F. *Contribution à l'étude des relations pluies-débits dans les petits bassins versants ruraux*. PhD thesis, EPFL, Lausanne, 1982. URL <http://library.epfl.ch/theses/?nr=453>, <http://library.epfl.ch/theses/?nr=453>.
- JCGM . *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*. BIPM Bureau International des Poids et Mesures, Paris, 3^eédition, 2012. JCGM : Joint Committee for Guides in Metrology.
- JEAN A. P., LIBELLE T., MIRANVILLE F. et MEDINA M. A. Vegetalized complex partition (vcp) : Impact of a green roof under a humid tropical climate, comparison between hong-kong and reunion island. *Applied Mechanics and Materials Journal*, 2014. ISSN 1660-9336. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01110507v1>.
- JEAN A. P. et MIRANVILLE F. Toitures végétalisées : Présentation du concept et bénéfices pour l'île de la réunion, 2011. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01165874v2>. Article écrit pour le Forum des Jeunes Chercheurs 2011, Université de la Réunion.
- JIM C. et HE H. Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem. *Ecological Engineering*, 36 :1052-1063, 2010.
- JIM C. et PENG L. L. Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof. *Urban Forestry and Urban Greening*, 11 :73-85, 2012. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2011.10.001>.

- JIM C. et TSANG S. Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Building and Environment*, 46 :1263–1274, 2011a. ISSN 0360-1323. doi : 10.1016/j.buildenv.2010.12.013. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V23-51SWG11-1/2/206216e3ba9ede0ee1caa039cc5ed327>.
- JIM C. et TSANG S. Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs. *Energy and Buildings*, In Press, Corrected Proof(43) :1341–1350, 2011b. ISSN 0378-7788. doi : 10.1016/j.enbuild.2011.01.012. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-5236R9P-2/2/a64369112f4267608c6c6ef3837bd0b6>.
- JONCKHEERE I., FLECK S., NACKAERTS K., MUYS A., COPPIN P., WEISS M. et BARET F. Review of methods for in situ leaf area index determination. part i. theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121 :19–35, 2004.
- JONES H. *Plants and microclimate*. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- KELLER S. New roof for a new century. In *Proc. 2th Annual International Conference EBA New York*, 2003. Keynote Presentation.
- KÖHLER M. et KEELEY M. The green roof tradition in germany : The example of berlin. In HOFFMAN L. et McDONOUGH W., editors, *Green Roofs : Ecological Design and Construction*, page 108–112, New York : Schiffer, 2005.
- KÖHLER M., SCHMIDT M. et LAAR M. Roof gardens in brazil. In *World Climate and Energy Event*, Rio de Janeiro, Brazil, 1–5 December 2003.
- KIPP&ZONEN . *Instruction Manual*, 2013. URL www.kippzonen.com.
- KOEHLER M. Energetic effects of green roofs to the urban climate near to the ground and to the building surfaces. In *International Green Roof Congress*, Stuttgart-Nürtingen, 14-15 septembre 2004.
- KOENIGSBERGER O., INGERSOLL T., MAYHEW A. et SZOKOLAY S. Manuel of tropical housing and building design : Part 1 climatic design. Technical report, Longman, London, 1973.
- KUMAR O. R. et KAUSHIK S. C. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment*, 40(11) :1505–1511, 2005.
- KUTILEX M., KREJCA M., HAVERKAMP R., RENDON L. et PARLANG J. On extrapolation of algebraic infiltration equations. *Soil Technology*, 1 :47–61, 1988.
- ŠKYANC I., ZUPANČIČ B. et FURLAN B. Theoretical and experimental fuzzy modelling of building dynamic response. *Building and Environment*, 36 :1023–1038, 2001.
- LAZZARIN R., CASTELLOTTI F. et BUSATO F. Experimental measurements and numerical modeling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37 :1260–1267, 2005.
- LIÉBARD A. et HERBE A. D. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique*, 2005.
- LIESECKE H.-J., KRUPKA B. et BRUEGGEMANN H. Ausführung und unterhaltung von extensivbegrünungen und einfachen intensivbegrünungen. In *Grundlagen der Dachbegrünung Zur Planung*, page 18, Patzer Verlag, Berlin - Hannover, 1989.
- LIU K. K. Y. Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation. In *RCI 18th International Convention and Trade Show*, pages 1–15, Tampa, Florida, mars 2003. URL <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc46294/nrcc46294.pdf>.
- LIU K. K. Y. Sustainable building envelope - garden roof system performance. In *2004 RCI Building Envelope Symposium*, pages 1–14, New Orleans, LA., November 2004-11-04. URL <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc47354/nrcc47354.pdf>.

- LIU K. K. Y. Vers des systèmes de couverture durables. In *Regard 2005 sur la science du bâtiment, Les toitures : à la hauteur de la technologie et du changement*. CNRC-NRC, September 2005. NRCC-48173f.
- LIU K. K. Y. et BASKARAN B. A. Thermal performance of green roofs through field evaluation. In *Proceedings for the First North American Green Roof Infrastructure Conference, Awards and Trade Show*, pages 1–10, Chicago, IL, May 2003. URL <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc46412/nrcc46412.pdf>.
- LIU K. K. Y. et BASKARAN B. A. Green roof infrastructure - technology demonstration, monitoring and market expansion project. Technical report, NRC-CNRC, mai 2004. URL <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/b1054.1/b1054.1.pdf>.
- LIU K. K. Y. et MINOR J. Performance evaluation of an extensive green roof. In *Greening Rooftops for Sustainable Communities*, pages 1–11, Washington, D.C., mai 2005. URL <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc48204/nrcc48204.pdf>.
- LODER A. ‘there’s a meadow outside my workplace’ : A phenomenological exploration of aesthetics and green roofs in chicago and toronto. *Landscape and Urban Planning*, x(x) : xxx, 2014. ISSN 0169-2046. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.008>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204614000097>.
- MARA T. *Contribution à la validation globale d’un logiciel de simulation thermo-aérodynamique du bâtiment : proposition de nouveaux outils d’aide à la validation*. Thèse de doctorat, Université de La Réunion, France, 2000.
- MÉTÉO FRANCE . Précipitation et irradiation à la réunion, 2010. URL http://www.meteo.fr/temps/domtom/La_Reunion/meteoreunion2/. Vu le 28 juin 2010.
- MCCARTHY J., CANZIANI O., LEARY N., DOKKEN D. et WHITE K. Climate change 2001 : Impacts, adaptation, and vulnerability. In PRESS U. C. U., editor, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, 2001.
- MCHIRGUI W. *Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique : Application aux matériaux cimentaires*. Thèse de doctorat, spécialité : Mécanisme et génie civil, Université de La Rochelle, France, Mai 2012. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00823902>.
- MELLOR R., SALISBURY F. et RASCHKE K. Leaf temperatures in controlled environment. *Planta*, 61(1) :56–72, 1964.
- MILLET J. R. Conception thermique des bâtiments en climatisation naturelle dans les D.O.M. Document d’application n° 88.4343, C.S.T.B, 1988. 124p.
- MINKE G. et WITTER G. Haeuser mit gruenem pelz, ein handbuch zur hausbegruenung. In *Verlag Dieter Fricke GmbH*, 1982.
- MIRANVILLE F. *Parois Complexes en Physique du Bâtiment : le cas des produits minces réfléchissants pour la conception thermique passive en climat tropical*. Editions Universitaires Européennes, Novembre 2010. ISBN :978-613-1-54637-2.
- MIRANVILLE F., BOYER H., MARA T. et GARDE F. 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, 2003.
- MIRANVILLE F., SÉRIACARUPIN J. et BOYER H. Détermination expérimentale et numérique de la performance thermique de produits minces réfléchissants multirélecteurs. Rapport final de convention, Université de La Réunion, 2006. Société ACTIS SA.

- MIRANVILLE F. *Contribution à l'Etude des Parois Complexes en Physique du Bâtiment : Modélisation, Expérimentation et Validation Expérimentale de Complexes de Toitures incluant des Produits Minces Réfléchissants en climat tropical humide*. Thèse de doctorat, spécialité : Génie civil et physique du bâtiment, Université de La Réunion, France, Décembre 2002. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00463069>.
- MISSION L., PANEK J. et GOLDSTEIN A. A comparison of three approaches to modeling leaf gas exchange in annually drought-stressed ponderosa pine forest. *Tree Physiology*, 24 :529–541, 2004.
- MOODY S. S. et SAILOR D. J. Development and application of a building energy performance metric for green roof systems. *Energy and Buildings*, 60(0) :262 – 269, 2013. ISSN 0378-7788. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.002>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813000698>.
- NAYAK J., SRIVASTAVA A., SINGH U. et SODHA M. The relative performance of different approaches to the passive cooling of roofs. *Building and Environment*, 17(2) :1450–1461, 1982.
- NIELD D. et BEJAN A. *Convection in porous media*, chapter 2 : Heat Transfer Through a Porous Medium. Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-5540-0. doi : 10.1007/978-1-4614-5541-7_2. URL <http://www.springer.com/978-1-4614-5540-0>. XXVI, 778p., Hardcover.
- NORMAN J. *Modiffcation of the Aerial Environment of Crops*, chapitre Modeling the complete crop canopy. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, USA, b.j. barffld and j. gerber edition, 1976.
- NOURI H., BEECHAM S., KAZEMI F. et HASSANLI A. M. A review of et measurement techniques for estimating the water requirements of urban landscape vegetation. *Urban Water Journal*, 10(4) :247–259, 2013. doi : 10.1080/1573062X.2012.726360. URL <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2012.726360>.
- OBERNDORFER E., LUNDHOLM J., BASS B., COFFMAN R., DOSHI H., DUNNETT N., GAFFIN S., KÖHLER M., LIU K. et ROWE B. Green roofs as urban ecosystems : Ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 10(57) :823–833, 2007. doi :10.1641/B571005.
- ONMURA S., MATSUMOTO M. et HOKOI S. Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens. *Energy and Buildings*, 33(7) :653 – 666, 2001. ISSN 0378-7788. doi : 10.1016/S0378-7788(00)00134-1. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-43KGDG7-2/2/6903431707d6cbea45803f0576f95846>.
- OSMUNDSON T. *Roof Gardens*. Norton, New York, 1999.
- OULDBOUKHITINE S.-E., BELARBI R., JAFFAL I. et TRABELSI A. Assessment of green roof thermal behavior : A coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment*, 46 (12) :2624 – 2631, 2011. ISSN 0360-1323. doi : 10.1016/j.buildenv.2011.06.021. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311002010>.
- OULDBOUKHITINE S.-E., SPOLEK G. et BELARBI R. Impact of plants transpiration, grey and clean water irrigation on the thermal resistance of green roofs. *Ecological Engineering*, 67(0) : 60 – 66, 2014. ISSN 0925-8574. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.052>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857414001128>.
- PALOMO DEL BARRIO E. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, 27(2) :179 – 193, 1998. ISSN 0378-7788. doi : 10.1016/S0378-7788(97)00029-7. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-3SYYRFM-8/2/76c9c392d44ffdf2d7f7363c3efed5fc>.

- PEARLMUTTER D. et ROSENFELD S. Performance analysis of a simple roof cooling system with irrigated soil and two shading alternatives. *Energy and Buildings*, 40(5) :855 – 864, 2008. ISSN 0378-7788. doi : 10.1016/j.enbuild.2007.06.004. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-4P1X7H3-2/2/b51ce53ed694ffa806fd6183cc2e629b>.
- PECK S. W. et CALLAGHAN C. Greenbacks from green roofs : Forging a new industry in canada. Technical report, P & A Associates, 1999.
- PECK W. S. Tokyo implements green roof requirements to reduce urban heat island. In STEVEN P. W. et SUSAN M., editors, *Green Roof Infrastructure Monitor*, volume 3(2), page 4. The Cardinal Group Inc., 2001. Rapport de 25^egreen roof workshop, Ottawa.
- PERINO M., SERRA V. et FILIPPI M. Monitoraggio del comportamento termico di un tetto verde : procedura di misura e relative problematiche. In *ATI 2003*, Padova, Italie, 2003a.
- PERINO M., SERRA V. et FILIPPI M. Monitoraggio del comportamento termico di un tetto verde : primi risultati sperimentali. In *ATI 2003*, pages 1863–1872, Padova, Italie, 2003b.
- PERRIER A. *Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux : Profils microclimatiques, évapotranspiration et photosynthèse nette*. Thèse de doctorat d'état ès sciences physiques, Institut National de la Recherche Agronomique, France, 1976.
- PHILIP J. R. Hillslope infiltration : Planar slopes. *Water Resour. Res.*, 27(1) :109 – 117, 1991.
- PIELKE R. *Mesoscale meteorological modeling*. San Diego : Academic Press, 2002.
- PIEPER J. The nature of hanging gardens, March 15 1987.
- PIERRE T. Adaptation méthodologique d'une sonde réflectométrique pour la mesure de l'humidité des sols. application aux sols de la réunion. nouvelles perspectives. Mémoire daa : Génie agronomique, Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier, Montpellier, 1993. 58 p.
- RANA G. et KATERJI N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under mediterranean climate : a review. *European Journal of Agronomy*, 13(1) :125–153, 2000.
- REZAEI F. Evapotranspiration rates from extensive green roof plant species. Master's thesis, Agricultural and Biological Engineering, Pennsylvania State University, State College, PA., 2005.
- SABRE M. et BULTEAU G. Végétaliser les toitures et terrasses. revue "Pour la science", n° 403, mai 2011.
- SAILOR D. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40(8) :1466–1478, 2008.
- SAIZ S., KENNEDY C., BASS B. et PRESSNAIL K. Comparative life cycle, assessment of standard and green roofs. *Environmental Science and Technology*, 40 :4312–4316, 2006.
- SAVIDAN L., SCHAFFAR A., DIMOU M. et GARDE F. La consommation énergétique des ménages à la réunion : vers un retour à l'autonomie par le biais des énergies renouvelables. *Études caribéennes*, 2011. doi : 10.4000/etudescaribeennes.3519. URL <http://etudescaribeennes.revues.org/3519>. Mis en ligne le 06 juin 2011, consulté le 28 janvier 2014.
- SCHMIDT M. Energy saving strategies through the greening of buildings the example of the institute of physics of the humboldt university in berlin-adlershof. In *RIO 3 - World Climate and Energy Event*, Rio de Janeiro, Brazil, 1-5 décembre 2003.
- SCHNEIDER S. Architektur und natur. *Baumeister*, 99(8) :27, 2002. Callwey.

- SCURLOCK J. M. O., ASNER G. P. et GOWER S. T. Worldwide historical estimates of leaf area index, 1932–2000. Technical report, Oak Ridge National Laboratory, December 2001.
- SFAKIANAKI A., PAGALOU E., PAVLOU K., SANTAMOURIS M. et ASSIMAKOPOULOS M. N. Theoretical and experimental analysis of the thermal behaviour of a green roof system installed in two residential buildings in athens, greece. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, 33 :1059–1069, 2009. doi : 10.1002/er.1535.
- SINGH V. P. et FREVERT D. K., editors. *Watershed models*. CRC Press, London, taylor & francis group edition, 2006.
- SKAGGS R. W. et KHALEEL R. *In Hydrology of Small Watersheds*, chapitre 4 : Infiltration. ASAE, St Joseph, Michigan, 1982.
- SMITH-SCHNEIDER P. *Comportement thermo-aéraulique des bâtiments : Stratégies de résolution du problème couplé*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 1994. 247p.
- SONNE J. Evaluating green roof energy performance. *ASHARE Journal*, 48 :59–61, February 2006.
- STAHHGHELLINI C. *Transpiration of greenhouse crops*. PhD thesis, Agricultural University, Wageningen, 1987.
- TABARES-VELASCO P. C. et SREBRIC J. Experimental quantification of heat and mass transfer process through vegetated roof samples in a new laboratory setup. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(25-26) :5149 – 5162, 2011. ISSN 0017-9310. doi : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.08.034. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931011004790>.
- TABARES-VELASCO P. *Predictive heat and mass transfer model of plant-based roofing materials for assessment of energy savings*. PhD thesis, The Pennsylvania State University, Department of Architectural Engineering, décembre 2009.
- TABARES-VELASCO P. et SREBRIC J. The role of plants in the reduction of heat flux through green roofs : Laboratory experiments. In *ASHRAE Transactions*, 2009a.
- TABARES-VELASCO P. et SREBRIC J. Heat fluxes and water management of a green and brown roof : Laboratory experiments. In *Seventh Annual International Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference*, juin 2009b.
- TABARES-VELASCO P. et SREBRIC J. A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions. *Building and Environment*, 49 :310–323, 2012.
- TAKAKURA T., KITADE S. et GOTO E. Cooling effect of green cover over a building. *Energy and Buildings*, 31 :1–6, 2000.
- TAKEBAYASHI H. et MORIYAMA M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*, 42 :2971–2979, 2000.
- TEEMUSK A. et MANDER . Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems. *Ecological Engineering*, 36 :91–95, 2010.
- TEJEDA-MARTINEZ A. *Sobre mediciones y parametrizaciones del balance energetico y la estabilidad atmosferica en la ciudad de Mexico*. PhD thesis, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 1996.
- THEODOSIOU T. G. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy and Buildings*, 35(9) :909 – 917, 2003. ISSN 0378-7788. doi : 10.1016/S0378-7788(03)00023-9. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-48B01WH-1/2/ac54a11ef45937f21555f84697b647d8>.

- TITOVA N. Rooftop gardens. *Science in the USSR*, 5 :20–25, September-October 1990.
- VAN DE GRIEND A. O. M. Bare soil surface resistance to evaporation by vapor diffusion under semiarid conditions. *Water Resour. Res.*, 2(30) :181–188, 1994.
- VANWOERT N., ROWE D., ANDRESEN J., RUGH C. et XIAO L. Watering regime and green roof substrate design affect sedum plant growth. *HortScience*, 40(3) :659–664, 2005.
- VILLENEUVE N. et BACHÈLERY P. Revue de la typologie des éruptions au piton de la fournaise, processus et risques volcaniques associés. *Cybergeo : European Journal of Geography*, mars 2006. doi : 10.4000/cybergeo.2536. URL <http://cybergeo.revues.org/2536>. Revue en ligne.
- WATSON D. Comparative physiological studies in the growth of field crops. i. variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Bot.*, 11 :41–76, 1947.
- WEISS M., BARET F., SMITH G., JONCKHEERE I. et COPPIN P. Review of methods for in situ leaf area index (lai) determination. part ii. estimation of lai, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121 :37–53, 2004.
- WETTER M. A generic optimization program. In OF THE 7TH IBPSA CONFERENCE P., editor, *Proc. 2th Annual International Conference EBA New York*, page 601–608, 2009. Rio de Janeiro, Brazil.
- WOLFSON R. et PASACHOFF J. M. *The Thermal Behaviour of Matter in Physics With Modern Physics for Scientists and Engineers*, chapter 20. Harper Collins College Publishers, New York, seconde edition, 1995.
- WOLOSYN M. *Modélisation hygro-thermo-aéraulique des bâtiments multizones. Proposition d'une stratégie de résolution du système couplé*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 1999.
- WONG N., CHEONG H., YAN H., SOH J., ONG C. et SIA A. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in singapore. *Energy and Buildings*, 35(4) : 353–364, 2003a.
- WONG N., CHEN Y., ONG C. et SIA A. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment*, 38(4) :261–270, 2003b.
- YAMANAKA T., TAKEDA A. et SUGITA F. A modified surface-resistance approach for representing bare-soil evaporation : Wind tunnel experiments under various atmospheric conditions. *Water Resource Res.*, 33 :2117–2128, 1997.
- ZHANG J., FANG X., ZHANG H., YANG W. et ZHU C. A heat balance model for partially vegetated surfaces. *Infrared Physics and Technology*, 28 :287–294, 1997.

Bibliographie et Tables

Table des matières générale

Remerciements	c
Philosophie du Manuscrit	e
Introduction générale	g
Sommaire général	i
I Contexte et état de l'art	1
1 Introduction	5
1.1 Défis énergétiques et réchauffement global	5
1.1.1 Les enjeux de la maîtrise de l'énergie	5
1.1.2 Cas spécifique de La Réunion	6
1.2 Les parois végétalisées	8
1.2.1 Présentation succincte	8
1.2.1.1 Constitutivement	8
1.2.1.2 Historiquement	8
1.2.1.3 Scientifiquement	8
1.2.1.4 Réglementairement	9
1.2.2 Une solution pour diverses problématiques	10
1.2.2.1 Solution à la problématique urbaine	10
1.2.2.2 Solution aux objectifs réunionnais	10
1.2.2.3 Solution ayant de nombreux atouts	10
2 Étude bibliographique	13
2.1 Approche expérimentale	13
2.1.1 Types d'expériences	13
2.1.1.1 Le flux de chaleur	14
2.1.1.2 La résistance thermique	14
2.1.1.3 L'évapotranspiration	15
2.1.1.3.1 <i>Hydrologique</i>	15
2.1.1.3.2 <i>Micro-météorologique</i>	16
2.1.1.3.3 <i>Physiologie des plantes</i>	17
2.1.1.3.4 <i>synthèse</i>	18
2.1.1.4 Expériences en laboratoire	18
2.1.1.5 Synthèse typologique	19
2.1.2 Les résultats expérimentaux	20
2.1.2.1 Impact sur les températures	20
2.1.2.2 Répartition des flux énergétiques	20

2.1.2.3	Impact sur le transfert thermique	23
2.1.2.4	Influence de l'épaisseur	24
2.1.2.5	Influence dynamique : saisonnalité	25
2.1.2.6	Influence du climat	26
2.1.2.7	Impact sur la demande en énergie	27
2.1.2.8	Synthèse des résultats expérimentaux	28
2.2	Approche théorique	30
2.2.1	Les types de modélisation	30
2.2.1.1	Pluralité des domaines	30
2.2.1.2	Les sous-modèles	31
2.2.1.3	Caractérisation du modèle	32
2.2.2	Description des transferts inhérents aux PCV _H	33
2.2.2.1	Transferts énergétiques	33
2.2.2.2	Transferts massiques	34
2.2.2.3	Impact de la végétation	35
2.2.2.4	Couplage	36
2.2.3	Les modèles de PCV déterministes simplifiés présents dans la littérature	37
2.2.3.1	Les hypothèses simplificatrices	37
2.2.3.2	L'évolution des approches	38
2.2.3.3	Synthèse des modèles déterministes simplifiés	42
3	Problématique	47
3.1	Le sujet	47
3.2	Objectifs des recherches	48
3.3	Environnement de recherche	48
3.4	Définition de la problématique	50
4	Synthèse	51
II	Concept de parois complexes végétalisées et méthodologie	53
1	Analyse et définitions syntaxiques	57
1.1	Introduction	57
1.1.1	Un concept multi-millénaire	57
1.1.1.1	Avant le -VI ^{ème} siècle	57
1.1.1.2	Du -VI ^{ème} au X ^{ème} siècle	58
1.1.1.3	Du XVII ^{ème} au XX ^{ème} siècle	58
1.1.1.4	Depuis le XX ^{ème} siècle	59
1.1.2	Nécessité d'une approche nouvelle	59
1.1.2.1	Limite des dénominations actuelles	59
1.1.2.2	Absence de classification générique	60
1.2	La notion de PCV	61
1.2.1	Présentation du concept	61
1.2.1.1	Définition	61
1.2.1.2	Classification de ce type de paroi	61
1.2.2	Nomenclature des PCV	62
1.2.2.1	Formulation générique	62
1.2.2.2	Approche descriptive	63
1.2.2.3	Approche typologique	63
1.3	Une innovation : la PCV ligneuse sur lame d'air	65
1.3.1	Caractérisation physique	67

1.3.2	Adéquation au contexte	67
1.3.3	Un concept innovant	68
1.3.4	Rafraîchissement biologique	69
1.3.4.1	Définition	69
1.3.4.2	Couplage bâti/végétation	69
1.3.4.3	Phénomènes à l'origine du rafraîchissement	69
2	Stratégie générale	71
2.1	Concepts méthodologiques	71
2.2	Méthodologie utilisée	72
3	Méthode et outils	75
3.1	Expérimentation	75
3.1.1	Supports expérimentaux in-situ	75
3.1.2	Méthode comparative	75
3.2	Modélisation	76
3.2.1	Modélisation semi-détaillée, générique et multi-modèle	76
3.2.2	Environnement et couplage à un code de simulation	76
3.3	Validation et optimisation	76
3.3.1	Analyse de sensibilité	77
3.3.2	L'outil GENOPT	77
3.4	Application	77
4	Synthèse	79
III	Expérimentation	81
1	Infrastructures	85
1.1	La plateforme expérimentale	85
1.1.1	Situation	85
1.1.2	Description	86
1.2	Stations météorologiques	87
1.2.1	La station fixe	88
1.2.2	La station portable	88
1.3	Les supports expérimentaux	88
1.3.1	Les supports dédiés à la PCV : les bacs végétalisés	88
1.3.2	Les supports dédiés au couplage PCV-enveloppe : les modules ISOTEST	89
2	Démarche Expérimentale	91
2.1	Objectifs	91
2.2	Scenarii expérimentaux	91
2.2.1	Cas classique : Toit terrasse ($PCV_{ce}^{T_e}$)	92
2.2.2	Cas classique adapté : Installation sur tôle en pente ($PCV_{ce}^{T_h}$)	94
2.2.3	Cas innovant : PCV ligueuse sur tôle ($PCV_{Lsa}^{T_h}$)	96
3	Capteurs et chaîne d'acquisition	101
3.1	Description des capteurs	101
3.1.1	Transferts énergétiques	101
3.1.1.1	Température de surface de paroi	101
3.1.1.2	Température radiante moyenne	101
3.1.1.3	Température de surface de végétation	102
3.1.1.4	Température de substrat	102
3.1.1.5	Flux de chaleur	103
3.1.1.6	Albédo de la toiture	103

3.1.1.7	Protection radiative de la canopée : LAI	103
3.1.2	Transferts massiques	104
3.1.2.1	Teneur en eau du substrat	104
3.1.2.2	Humidité relative	105
3.1.3	Grandeurs climatiques	105
3.1.3.1	Pression atmosphérique	105
3.1.3.2	Irradiation solaire	105
3.1.3.3	Pluviométrie	105
3.1.3.4	Humidité relative et température	105
3.1.3.5	Vitesse et direction du vent	106
3.2	Réglages métrologiques	106
3.2.1	Étalonnage et ajustages des capteurs	106
3.2.1.1	Fluxmètres	106
3.2.1.2	Ceptomètre	106
3.2.1.3	Sondes réflectométriques	107
3.2.1.4	Hygromètres	107
3.2.1.5	Albédomètres	107
3.2.1.6	Thermocouples	108
3.2.2	Vérification de l'expérimentation	109
3.2.2.1	Les bacs végétalisés	109
3.2.2.2	ISOTEST	111
3.3	Installation sur les supports expérimentaux	113
3.3.1	Les bacs végétalisés	113
3.3.2	Les modules ISOTEST	114
3.3.2.1	Interférence des capteurs	114
3.3.2.2	chaîne d'acquisition	114
4	Développements spécifiques	117
4.1	Hygromètres	117
4.1.1	Objectifs	117
4.1.2	Ajustage et étalonnage des hygromètres	117
4.1.2.1	Méthodologie	117
4.1.2.2	Création du module d'ajustage	118
4.1.2.2.1	<i>Cahier des charges</i>	118
4.1.2.2.2	<i>Conception</i>	118
4.1.2.2.3	<i>Mode opératoire</i>	118
4.1.2.3	Étalonnage des sondes sans protection	119
4.1.3	Développement des protections	120
4.1.3.1	Approche	120
4.1.3.2	Recherche de la protection adéquate	120
4.1.4	Étalonnage des capteurs finaux	123
4.1.5	Synthèse	123
4.2	Albédomètres	124
4.2.1	Objectifs et méthodologie	124
4.2.2	Montage sur les ISOTEST	124
4.2.2.1	Position	124
4.2.2.2	Optimisation de la hauteur	124
4.2.2.3	Impact de l'ombre portée	125
4.2.3	Les cylindres	126
4.2.3.1	Conception des cylindres	126

4.2.3.2	Impact du cylindre	127
4.2.4	Le banc d'essai	128
4.2.4.1	Cahier des charges	128
4.2.4.2	Conception	128
4.2.4.3	Mode opératoire	129
4.2.5	Résultats	130
4.2.6	Synthèse	130
5	Analyse des séquences Expérimentales	131
5.1	Les périodes de mesures	131
5.2	Observations sur bacs végétalisés	133
5.3	Observations sur modules ISOTEST	136
5.3.1	Résultats de la $PCV_{ce}^{T_h}$	136
5.3.2	Résultats de la $PCV_{Lsa}^{T_h}$	138
5.3.3	Comparatif : Influence sur la température de plafond	141
6	Exploitation des résultats	145
6.1	Introduction	145
6.2	Cinétique et répartition des flux thermiques	145
6.2.1	Approche	145
6.2.2	Résultats et analyses	146
6.3	Indicateurs de performance	150
6.3.1	Le facteur de transmission	150
6.3.2	La résistance thermique apparente	152
7	Synthèse	155
IV	Modélisation et Simulation	159
1	Introduction	163
1.1	Objectifs	163
1.2	Stratégie de modélisation	163
1.2.1	Choix du type de modèle	163
1.2.2	L'environnement ISOLAB	164
1.2.3	Le code de calcul dédié	165
2	Le système d'étude	167
2.1	Description physique	167
2.2	Phénoménologie	168
2.2.1	Les sollicitations extérieures	168
2.2.2	L'air extérieur	168
2.2.3	La canopée	169
2.2.4	La lame d'air	170
2.2.5	Le substrat	170
2.2.6	La structure	171
2.2.7	Les sollicitations intérieures	171
3	Position du problème et formalisme	173
3.1	Approche générale et hypothèses	173
3.2	Les transferts thermiques	176
3.2.1	Les phénomènes considérés	176
3.2.2	L'équation de transfert	177
3.2.3	Conditions aux limites	180
3.2.3.1	Convection	180

3.2.3.1.1	<i>Présentation</i>	180
3.2.3.1.2	<i>Formalisme</i>	180
3.2.3.2	Rayonnement	180
3.2.3.2.1	<i>Présentation</i>	180
3.2.3.2.2	<i>Formalisme des couches semi-transparentes</i>	181
3.3	Les transferts de masse	183
3.3.1	Les phénomènes considérés	183
3.3.2	Les transferts hydriques	184
3.3.2.1	L'équation de transfert	184
3.3.2.2	Les apports	186
3.3.2.2.1	<i>L'irrigation interne</i>	186
3.3.2.2.2	<i>L'irrigation aérienne</i>	187
3.3.2.2.3	<i>Les précipitations</i>	187
3.3.2.3	Les termes sources	187
3.3.2.3.1	<i>L'interception</i>	187
3.3.2.3.2	<i>Stockage libre</i>	187
3.3.2.3.3	<i>Stockage lié</i>	188
3.3.2.4	Les pertes	188
3.3.2.4.1	<i>La percolation</i>	188
3.3.2.4.2	<i>Le ruissellement</i>	188
3.3.3	Les transferts hygriques	188
3.3.3.1	L'équation de transfert	188
3.3.3.2	Les apports	190
3.3.3.2.1	<i>La convection</i>	190
3.3.3.2.2	<i>L'advection</i>	191
3.3.3.3	Les termes sources	191
3.3.3.3.1	<i>La transpiration</i>	191
3.3.3.3.2	<i>Formalisme</i>	192
3.3.3.3.3	<i>L'évaporation</i>	192
3.3.3.3.4	<i>La condensation</i>	192
3.4	Les paramètres botaniques	193
3.4.1	L'indice de surface foliaire	193
3.4.1.1	Le LAI	193
3.4.1.2	Le LAD	193
3.4.2	La résistance stomatique	193
3.4.3	La résistance aérodynamique	194
3.5	Couplage des transferts de chaleurs et de masse	194
4	Modèles physiques	197
4.1	Représentation du système	197
4.1.1	Les couches	197
4.1.2	Les frontières et liaisons	198
4.2	Modèles thermiques	199
4.2.1	Dans les couches solides	199
4.2.2	Dans les couches fluides	199
4.2.3	Dans les couches poreuses	199
4.2.4	Dans les couches végétales	200
4.2.5	Aux interfaces	201
4.3	Modèles hydriques	201
4.3.1	Dans les couches solides	201

4.3.2 Dans les couches fluides	201
4.3.3 Dans les couches poreuses	202
4.3.4 Dans les couches végétales	202
4.3.5 Aux interfaces	202
4.4 Modèles hygriques	203
4.4.1 Dans les couches solides	203
4.4.2 Dans les couches fluides	203
4.4.3 Dans les couches poreuses	203
4.4.4 Dans les couches végétales	204
4.4.5 Aux interfaces	204
4.5 Synthèse de la représentation	204
4.5.1 Synthèse des phénomènes	204
4.5.2 Analogies thermo-hydro-hygro-électriques	206
4.6 Système d'équation et numérisation	208
4.6.1 Le jeu d'équations différentielles	208
4.6.2 Discrétisation	208
4.6.3 Approche matricielle : le système d'état	209
5 Résolution et couplage	211
5.1 Présentation du code de calcul ISOLAB	211
5.2 Couplage des systèmes matriciels	212
5.2.1 Concaténation des systèmes matriciels	213
5.2.2 Affectation des termes de couplage	213
5.2.3 Validation du couplage	214
5.3 Méthodes de résolution sous ISOLAB	214
5.3.1 Les algorithmes de résolution	214
5.3.2 Les solveurs	215
5.4 Gestion des systèmes oscillants	216
5.4.1 Contexte	216
5.4.2 Approche	216
5.4.3 Algorithme	217
5.4.4 Estimation de la convergence	217
5.4.5 Vérification et impact	218
6 Le code PcvBat	219
6.1 Stratégie	219
6.2 Couplage avec ISOLAB	220
7 Simulations	221
7.1 Procédure de vérification	221
7.2 Simulation des cas d'études	222
7.2.1 Paramètres physiques et données climatiques	222
7.2.2 Présentation des résultats	226
7.3 Éléments de validation	229
7.3.1 Généralités	229
7.3.2 Cas de la tôle	229
7.3.3 Cas du substrat	230
7.3.4 Cas de la PCV Th _{ce}	231
7.3.5 Cas de la PCV Th _{sa}	231
7.3.6 Aspects dynamiques	237
7.4 Perspectives	247
8 Synthèse	249

V Synthèse Générale	251
Conclusion Générale	253
Perspectives	255
VI Bibliographie et Tables	i
Bibliographie	v
Table des matières générale	xvii
Nomenclature	xxvii
Lettres Latines	xxvii
Lettres Grecs	xxix
Indices	xxix
Exposants	xxx
Symboles	xxx
Acronymes	xxx
Liste des Tableaux	xxxiii
Liste des Figures	xxxvii
VII Annexes	
A Contexte historique, politique et environnemental	A - 1
1 État des lieux	A - 1
2 19 ^{ième} siècle : défi sanitaire	A - 1
3 20 ^{ième} siècle : défi énergétique	A - 1
4 21 ^{ième} siècle : défi environnemental et énergétique	A - 2
B Précipitation et Rayonnement à l'île de La Réunion	B - 1
1 Présentation de l'île de La Réunion	B - 1
2 Conditions locales : la ville de Saint-Pierre	B - 2
3 Précipitations à l'île de La Réunion	B - 2
4 Rayonnement global à l'île de La Réunion	B - 3
C Les PCV classiques et ligneuses	C - 1
1 Les PCV classiques	C - 1
2 Les PCV ligneuses	C - 2
D Acquisition spécifique des paramètres physiques	D - 1
1 Facteurs d'environnement et de voute céleste	D - 1
2 Emissivités	D - 3
2.1 Mesure : Surface supérieure de la tôle	D - 3
2.2 Mesure : Surface des feuilles	D - 3
3 Vitesse de vent dans la canopée	D - 4
4 Étude des feuilles de <i>Tristellateia Australasiae</i>	D - 5
5 Densité foliaire (LAI)	D - 7
6 Réflectance	D - 11
E Méthode d'homogénéisation	E - 1
F Modèles physiques	F - 1
1 Convection	F - 1
1.1 Sur une paroi	F - 1
1.2 Sur le substrat	F - 2
1.3 Sur la canopée	F - 2
1.4 Dans la canopée	F - 2

1.5	Sous la canopée	F - 3
2	Rayonnement	F - 3
2.1	Formalisme des sollicitations CLO	F - 3
2.2	Formalisme des sollicitations GLO externes	F - 4
2.3	Formalisme des sollicitations GLO internes	F - 5
2.3.1	La méthode des radiosités	F - 5
2.3.2	La méthode simplifiée	F - 6
3	Condensation	F - 6
G	Création de PcvBât	G - 1
1	Génèse	G - 1
1.1	Contexte et besoins	G - 1
1.2	Approche	G - 1
2	Structure et algorithmes	G - 2
2.1	Choix structurels	G - 2
2.1.1	Création du système	G - 3
2.1.2	Interprétation des conditions	G - 3
2.1.3	Création du fichier	G - 3
2.1.4	Autres solutions	G - 4
2.2	Organisations	G - 4
2.2.1	Définition des fichiers nécessaires	G - 4
2.2.2	La création des fichiers de modèle	G - 6
2.2.3	Fonctionnement interne de PcvBât	G - 7
3	Interfaçage	G - 9
H	Apports à ISOLAB	H - 1
I	Communication sur les toitures végétalisées à La Réunion	I - 1
J	Regard croisé sur les PCV _{ce} à La Réunion et à Hong-Kong	J - 1

Bibliographie et Tables

Nomenclature

La nomenclature présentée ici correspond aux éléments les plus récurrents, les éléments spécifiques à une équation donnée sont uniquement explicités à la suite de cette dernière.

Lettres Latines

A_{H_2O}	Quantité d'eau arrivant sur la PCV (précipitations et arrosage)	[m]
C_{ss}^{vap}	Coefficient associé au transfert de flux de chaleur latent en surface du substrat	[/]
C_{vk}	Constante de VON KARMAN : 0.41	[/]
c_p	Chaleur spécifique massique (isobare si associée à un gaz)	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
$c_{p,v}^p$	Chaleur spécifique isobare de la vapeur d'eau dans l'air	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
$D_{a,v}^m$	Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air	[m ² .s ⁻¹]
D^m	Coefficient de diffusion massique	[m ² .s ⁻¹]
D^t	Coefficient de diffusion thermique	[m ² .s ⁻¹]
Dt	Durée	[s]
ET_o	Évapotranspiration pour du gazon des des conditions de référence	[mm.jr ⁻¹]
$E_{H_2O}^s$	Eau évaporée (en surface ou ou non) sortant du substrat	[m]
F^*	Le facteur de transmission apparent	[/]
H_{cv}	Coefficient de transfert thermique par convection	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
H_{veg}	Coefficient de transfert thermique par convection dans la canopée	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
$I_{H_2O}^s$	Eau infiltrée dans le substrat	[m]
It_{H_2O}	Eau interceptée par la canopée	[m]
$K_{m,l}$	Conductivité hydrique du milieu m	[m.s ⁻¹]
LAI_a	LAI actif	[/]
L_v	Chaleur latente de vaporisation	[J.kg ⁻¹]
N_u	Nombre adimensionnel de NUSSELT	[/]
P_a	Pression atmosphérique	[Pa]
P_{H_2O}	Eau percolée par le substrat	[m]

Suite page suivante

$Q_{H_2O}^s$	Eau absorbée par les plantes	[m]
R^*	La résistance thermique apparente	[/]
R_{H_2O}	Ruissellement en surface du substrat	[m]
$S_{H_2O}^d$	Eau liquide (libre) stockée dans les dépressions de surface	[m]
$S_{H_2O}^m$	Eau liquide (liée) stockée dans le milieu	[m]
$S_{H_2O}^{ss}$	Eau stockée dans les dépressions de surface du substrat	[m]
$S_{H_2O}^s$	Eau stockée dans le substrat (solide, liquide ou gazeuse)	[m]
$S_{ch,t}$	Nombre adimensionnel de SCHMIDT turbulent	[/]
T	Température	[K]
$T_{H_2O}^f$	Eau transpirée par les plantes	[m]
T_{vc}	Température de la voute céleste	[K]
$T_{x,c}$	Taux de renouvellement d'air dans la canopée	[s ⁻¹]
V_{tc}	Vitesse du vent au dessus de la canopée (cime)	[m.s ⁻¹]
V_{tf}	Vitesse du vent dans la canopée	[m.s ⁻¹]
V_{ts}	Vitesse de vent en surface du substrat	[m.s ⁻¹]
V_{tz}	Vitesse du vent à l'altitude z considérée	[m.s ⁻¹]
W_{act}	Quantité d'eau contenue actuellement dans le substrat	[m]
Z_0	Altitude du plan expérimental	[m]
Z_{ht}	Altitude de mesure de l'humidité et de la température de l'air	[m]
$Z_{r,i}^e$	Dimension de la rugosité gouvernant le transfert de chaleur et de vapeur d'eau en « i »	[m]
$Z_{r,i}^m$	Dimension de la rugosité gouvernant le transfert de la quantité de mouvement en « i »	[m]
Z_v	Altitude de mesure de la vitesse du vent	[m]
b	Constante empirique dépendant du type de substrat	[/]
e	Pression partielle en eau	[Pa]
$f_i(a)$	Fonction empirique dépendant de la variable « a » ($i \in \mathcal{N}$)	[/]
h_c	Hauteur de la canopée	[m]
h_v	Enthalpie massique de vaporisation de l'eau liquide	[J.kg ⁻¹]
h_{cv}	Conductance associée aux transferts thermiques par convection	[m.s ⁻¹]
k_{clo}	Coefficient d'extinction associé à τ_c^{clo}	[/]
k_c	Coefficient associé à la végétation observé lors du calcul de l'évapotranspiration <i>via</i> la méthode de l'ET ₀	[/]
k_{glo}	Coefficient d'extinction associé à τ_c^{glo}	[/]
l_f	Longueur caractéristique des feuilles de la canopée	[m]
q	Fraction massique en eau : masse d'eau par kg du milieu	[/]
r_a	Résistance aérodynamique	[s.m ⁻¹]
r_{sc}	Résistance stomatale de la canopée	[s.m ⁻¹]
r_{sf}	Résistance stomatale d'une feuille	[s.m ⁻¹]
r_{ss}	Résistance au passage de la vapeur d'eau en surface du substrat	[s.m ⁻¹]

Lettres Grecs

ϕ_{Sub}	Flux thermique traversant le substrat par conduction	[W]
κ_{at}^t	Facteur de stabilité atmosphérique	[/]
λ	Conductivité thermique	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
ω	Fraction volumique en eau : volume d'eau par m ³ du milieu	[m ³ .m ⁻³]
ρ	Masse volumique	[kg.m ⁻³]
ρ^*	Masse volumique spécifique	[kg.m ⁻³]
σ	Constante de STEPHAN-BOLTZMANN	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
σ_c	Taux de couverture de la PCV par la canopée	[m ² .m ⁻²]
σ_s	Taux de couverture de la PCV par le substrat	[m ² .m ⁻²]
τ_i	Transmittivité de la surface « i »	[/]
ε_i	Émissivité de la surface « i »	[/]
ϱ_c^*	Réfectivité de la canopée (si dense)	[/]
ϱ_i	Réfectivité de la surface « i »	[/]
ξ_i	Constante empirique ($i \in \mathbb{N}$)	[/]
ζ	Constante psychrométrique	[Pa.K ⁻¹]
ϕ	Flux thermique	[W]
ϕ_{St}	Flux énergétique (dé)stocké par le système (substrat et plantes)	[W]
ϕ_{Cv}	Flux énergétique dû à la convection	[W]
ϕ_{Ev}	Flux énergétique dû à l'évapotranspiration (chaleur latente)	[W]
ϕ_{Ex}	Flux énergétique perdu dans l'eau à l'exutoire	[W]
ϕ_{Ir}	Flux énergétique provenant de l'irradiation solaire nette (CLO)	[W]
ϕ_{PCV}	Flux énergétique entrant dans le bâtis associé à la PCV	[W]
ϕ_P	Flux énergétique produit par le système	[W]
ϕ_{Rd}	Flux énergétique dû aux échanges radiatifs (GLO)	[W]
ϕ_{SM}	Flux énergétique stocké par le métabolisme de la plante (photosynthèse et respiration)	[W]
Ψ_e	Correction pour le transfert de chaleur et de vapeur d'eau	[/]
Ψ_m	Correction pour le transfert de la quantité de mouvement	[/]
φ	Densité de flux thermique	[W.m ⁻²]
φ_{Ciel}	Densité de flux thermique provenant du ciel (GLO)	[W.m ⁻²]
φ_{Ir}	Densité de flux provenant de l'irradiation solaire nette (CLO)	[W.m ⁻²]

Indices

a Relatif à l'air libre au dessus de la canopée

Suite page suivante

<i>b</i>	Relatif au matériau composant la structure
<i>c,a</i>	Relatif à l'air dans la canopée
<i>c</i>	Relatif à la canopée
<i>e</i>	Relatif à l'eau
<i>f,s</i>	Relatif aux feuilles de la canopée, à saturation
<i>f</i>	Relatif aux feuilles de la canopée
<i>g</i>	Relatif au mélange substrat – air – eau
<i>s,v</i>	Relatif à la vapeur d'eau dans le substrat
<i>ss</i>	Relatif à la surface du substrat
<i>s</i>	Relatif au substrat

Exposants

<i>a</i>	Relatif à l'air
<i>c</i>	Relatif à la canopée
<i>m</i>	Relatif au transfert massique
<i>sat</i>	Relatif à la saturation de la grandeur considérée
<i>sec</i>	Relatif à la valeur « sèche » de la grandeur considérée
<i>ss</i>	Relatif à la surface du substrat
<i>s</i>	Relatif au substrat
<i>t</i>	Relatif au transfert thermique
<i>vap</i>	Relatif à l'évaporation

Symboles

\dot{a}	Dérivée temporelle de la grandeur « a » (\dot{a} en $[a].s^{-1}$)
\bar{a}	Valeur moyenne de la grandeur « a »
$ a $	Valeur absolue de la grandeur « a »

Acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ADIVET	Association pour le Développement et l'Innovation en Végétalisation Extensive de Toiture
ARER	Agence Régionale Énergie Réunion
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CLO	Courte Longueur d'Onde (spectre UV et visible)
CLO	Courte Longueur d'Onde.
CODYRUNC	Comportement DYnamique RéUNion
CSFE	Chambre Syndicale Française de l'Étanchéité
CVC	Chauffage, Ventilation et Climatisation
DBGR	Dynamic Benefit of Green Roofs
DBMS	Dynamic Benefit for Massive System
DOE	Department Of Energy (USA)
DPVs	Différence en Pression de Vapeur d'eau (à saturation en surface, <i>i.e.</i> : feuille, substrat, <i>etc.</i>)
DPV	Différence en Pression de Vapeur d'eau
DTU	Documents Techniques Unifiés
EM	Électro-Magnétique
ESP	Environmental systems performance
EnR	Énergies Renouvelables
FAO	Food and Agriculture Organization
FSE	Fond Social Européen
FTS	Facteur de Transmission Solaire
GERRI	Grenelle de l'Environnement à La Réunion : Réussir l'Innovation
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GLO	Grande Longueur d'Onde.
HAL	Hyper Archive en Ligne
HR	Humidité Relative
IRC-CNRC	Institut de Recherche en Construction - Conseil National de Recherche Canada
IUT	Institut Universitaire de Technologie
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LPPL	L ^A T _E X Project Public License
MEVA	Modélisation, Expérimentation, Validation puis Application
MEV	Modélisation, Expérimentation et Validation
NDVI	<i>Normalized Different Vegetation Index</i>
NF	Norme Française
ONU	Organisation des Nations Unies
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
PCV	Paroi Complexe Végétalisée
PCV_H	Paroi Complexe Végétalisée horizontale
PCV_V	Paroi Complexe Végétalisée verticale
PETREL	Plan Économique de Transition et de Relance <i>via</i> des Énergies 100% Locales

Suite page suivante

PHA	Potentiel d'Humidité relative Accessible
PMR	Paroi Mince Réfléchissante
PVC	PolyChlorure de Vinyle
PVC	Polychlorure de vinyle (acronyme anglophone)
PhyBât	Physique du Bâtiment
Piment	Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie et l'environnement
RNA	Réseaux de Neurones Artificiels
RPA	Région Photosynthétiquement Active
RT2012	Réglementation Thermique 2012
RTAA-DOM	Réglementation Thermique Acoustique et Aérolitique des Départements d'Outre Mer
SNPPA	Syndicat National du profilage des Produits Plats en Acier
SVAT	Sol-Végétation-ATmosphère
TRNSYS	Transient System Simulation Program
TSI	Total Sky Imager
UNEP	Union Nationale des Entrepreneurs du Paysage
UV	Ultra-Violet
WMO	World Meteorological Organisation (Genève, Suisse)

Bibliographie et Tables

Liste des Tableaux

I Contexte et état de l'art

2.1 Synthèse des approches expérimentales pour la mesure de l'évapotranspiration.	18
2.2 Sensibilité des flux relatifs à l'évapotranspiration, la conductivité du substrat et la convection dans différentes conditions	22
2.3 Caractérisation expérimentale de l'impact des PCV.	29
2.4 Liste des principaux codes de calcul intégrant un modèle de PCV _H	42
2.5 Liste des modèles basés sur des équations de bilans.	44
2.6 Détail des modèles de transfert utilisés dans les modèles de PCV les plus performants.	45

II Concept de parois complexes végétalisées et méthodologie

1.1 Liste des mots clefs se rapportant aux couches physiques de la PCV	66
1.2 Liste des mots clefs se rapportant aux inclinaisons de la PCV	66
1.3 Liste des mots clefs se rapportant aux compositions typologiques de la PCV	66

III Expérimentation

1.1 Moyennes des sollicitations météorologiques pour l'année 2011	86
1.2 Extrait d'un fichier de données météorologiques du 3 Septembre 2012.	87
1.3 Constitution inhérente aux bacs végétalisés.	89
1.4 Constitution des cellules ISOTEST selon les configurations choisies.	89
3.1 Données statistiques issues de l'étalonnage du pyranomètre n°1.	108
3.2 Données statistiques issues de l'étalonnage des thermocouples.	109
3.3 Données statistiques issues de l'étalonnage des bacs.	111
3.4 Données statistiques des capteurs principaux issus de l'étalonnage des ISOTEST.	112
5.1 Sollicitations météorologiques circadiennes moyennes durant la séquence expérimentale	132
5.2 Principales données statistiques circadiennes issues des mesures sous le substrat (PCV _{ce} ^{T_e}).	135

5.3	Principales données statistiques circadiennes mesurées au contact de la tôle (PCV_{ce}^{Th})	136
5.4	Principales données statistiques circadiennes mesurées au contact de la tôle (PCV_{Lsa}^{Th})	139
5.5	Principales données statistiques circadiennes mesurées en face interne du plâtre	141
5.6	Gain relatif à la température en face interne du plâtre	142
6.1	Moyennes des facteurs de transmission apparents pour une journée type de classe 1	151
6.2	Résistances apparentes associées aux « surtoitures »	153
6.3	Résistances apparentes associées à l'ensemble du complexe de toiture.	153

IV Modélisation et Simulation

4.1	Synthèse des approches conceptuelles pour chacun des cas d'études : les phénomènes considérés.	205
5.1	Valeurs des erreurs maxima observées inhérente à la gestion des oscillations	218
5.2	Temps de convergence inhérent à la gestion des oscillations	218
7.1	Paramètres associés à la simulation des 4 cas d'études.	223
7.3	Données statistiques de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISO-TEST 3	230
7.4	Données statistiques de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISO-TEST 1	230
7.5	Données statistiques de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISO-TEST 2	232
7.6	Données statistiques de la confrontation modèle/mesures pour la cellule ISO-TEST 4	232

VII Annexes

B.1	Sollicitations météorologiques du 1er janvier au 31 décembre 2011.	2
B.2	Évolution des moyennes mensuelles concernant les précipitations pour l'année 2010 à l'île de La Réunion	3
B.3	Évolution des moyennes mensuelles concernant le rayonnement global pour l'année 2010 à l'île de La Réunion	3
C.1	Propriétés des PCV classiques	1
D.1	Les facteurs formes associés à la voute céleste	2
D.2	Grandeurs géométriques associées aux feuilles de la <i>Tristellateia Australasiae</i>	6
D.3	Caractéristiques radiatives des feuilles	11
	(a) <i>Tristellateia Australasiae</i>	11
	(b) <i>Zoysia Tenuifolia</i>	11
G.1	Temps associés aux diverses étapes et méthodes étudiées.	5
	(a) Temps associés aux différentes approches d'appels des instructions.	5
	(b) Temps associés aux différentes approches d'appels des instructions (suite).	5

(c)	Temps associé aux tests numériques et cursifs.	5
(d)	Temps associé aux types de conditions.	5
(e)	Temps associé à la création de la chaine de caractère selon l'approche choisie.	5

Bibliographie et Tables

Liste des Figures

I Contexte et état de l'art

1.1	Vue aérienne de l'île de La Réunion. (Crédit : Hervé DOURIS)	7
1.2	Illustration d'une PCV _H	8
2.1	Répartition des flux à travers une PCV _H en été et en hiver.	21
(a)	En été	21
(b)	En hiver	21
2.2	Flux à travers une PCV _H : résultats expérimentaux.	22
(a)	Flux moyen en été (01-07-2001)	22
(b)	Flux moyen au printemps (14-04-2001)	22
(c)	Flux moyen en hiver (18-01-2001)	22
(d)	Flux mensuels moyen (22-11-2000 à 31-09-2001)	22
(e)	Couplage irradiation/température en été (01-07-2001)	22
(f)	Énergie nécessaire cumulée due au flux à travers la paroi (22-11-2000 à 31-09-2001)	22
2.3	Boite blanche : Exemple d'obtention du flux thermique par l'utilisation de l'équation de FOURIER dans un milieu solide homogène isotrope.	32
2.4	Boite noire : Exemple d'obtention du flux thermique par l'utilisation d'un RNA dans un milieu solide homogène isotrope dont la résistance thermique évolue en fonction de la température.	32
2.5	Boite grise : Exemple d'obtention du flux thermique dans une paroi composée de deux milieux solides homogènes isotropes dont les résistances thermiques sont respectivement fixes (utilisation de l'équation de FOURIER) et évoluant en fonction de la température (utilisation d'un RNA).	33
2.6	Modèle général de transfert énergétique associé aux PCV _H	34
2.7	Modèle général de transfert hydrique associé aux PCV _H	34
2.8	Modèle général des pertes par évapotranspiration associée à la présence de végétation sur la PCV _H	35
2.9	Représentation générale des transferts massiques et thermiques associés aux PCV _H	36
2.10	Agrandissement de la représentation générale des transferts massiques et thermiques à l'interface substrat – canopée.	36
3.1	Thématiques abordées par le groupe PhyBât	49

II Concept de parois complexes végétalisées et méthodologie

1.1	Illustration d'une toiture végétalisée classique (PCV_{ce})	60
(a)	Conception type d'une toiture végétalisée	60
(b)	Nanyang Technological University à Singapour. Crédit : Ali KRISCENSKI	60
1.2	Hierarchie des différents types de paroi : classement en fonction des phénomènes présents en leurs seins.	62
1.3	Formulation générique de la nomenclature associée aux PCV	63
1.4	$PCV_{S_bV}^{90} \equiv PCV_V$ composée d'un treillis contenant du substrat sur lequel pousse de l'herbe.	64
1.5	$PCV_{V_g}^{25} \equiv$ Pergola à 25° recouverte d'une plante grimpante.	64
1.6	$PCV_{S_tS_bV}^2 \equiv PCV_{cs}^{T_e} \equiv PCV_H$ classique de type semi-intensive, composée des couches structure, substrat et végétation.	65
1.7	$PCV_{S_tAV_g}^{45} \equiv PCV_{Lsa}^{T_v} \equiv$ Toiture à 45° recouverte d'une plante grimpante à 10 cm de la tôle.	65
1.8	Schéma du concept proposé.	67
1.9	Les phénomènes associés aux transferts thermiques et massiques présents au sein d'une PCV_{Lsa} (non exhaustif).	67
2.1	Synoptique : Recherche et résultats	72
2.2	Synoptique général de la résolution d'une problématique.	72

III Expérimentation

1.1	Sollicitations météorologiques du 1er janvier au 31 décembre 2011.	85
1.2	Plan d'implantation des infrastructures utilisées	86
1.3	Synoptique des chaînes d'acquisition associées aux infrastructures utilisées	86
1.4	Les deux stations météorologiques : « fixe » et « portable »	87
1.5	Descriptif structurel du bac	88
1.6	Descriptif structurel de base de l'ISOTEST	89
2.1	Schémas du cas classique.	92
2.2	<i>Zoysia Tenuifolia</i>	93
2.3	Instrumentation de la $PCV_{ce}^{T_e}$	94
2.4	Schémas du cas classique adapté.	95
2.5	Instrumentation de la $PCV_{ce}^{T_h}$	96
2.6	<i>Tristellateia Australasiae</i>	98
2.7	Instrumentation de la $PCV_{Lsa}^{T_h}$	99
2.8	Schémas du cas innovant.	99
3.1	Cliché d'un thermocouple type T installé en toiture.	101
3.2	Cliché d'un globe noir en toiture.	101
3.3	Le capteur ³ IR100	102
3.4	Schéma d'une Thermopile (type T)	103
3.5	Le fluxmètre HUKSEFLUX	103
3.6	Le Ceptomètre	104
3.7	La sonde CS616	104
3.8	Le CMP11	105
3.9	Le SBS500	105
3.10	La CS215 ³	105

3.11 Les capteurs VECTOR INS.	106
3.12 Mise en œuvre de l'étalonnage pour une sonde ROTRONIC.	107
3.13 Étalonnage des températures de référence des multiplexeurs.	111
3.14 Détail de l'instrumentation dans les bacs végétalisés	113
3.15 Synoptique de la chaîne d'acquisition de mesures des bacs végétalisés	113
3.16 Agencement optimal des capteurs en surface de toiture de l'ISOTEST	114
3.17 Détail de l'instrumentation des cellules ISOTEST	115
3.18 Synoptique de la chaîne d'acquisition de mesures des cellules ISOTEST	116
4.1 Module développé pour l'ajustage des sondes hygrométriques.	118
4.2 Prototype 1	121
4.3 Prototype 3	121
4.4 Prototype 4	121
4.5 Prototype 5	122
4.6 Prototype 6	122
4.7 Prototype 7	122
4.8 Mesures obtenues avec les principaux prototypes.	123
4.9 Banc d'essai et prototypes de protection testés.	123
4.10 Angles solides issus du pyranomètre.	125
4.11 Optimisation de la hauteur de l'albédomètre sur l'ISOTEST 1 sur $[-0,14;1,00]$ m.	125
4.12 Ombre portée du pyranomètre au cours de la journée du 28 juin.	126
4.13 Patron du cylindre de protection pour l'ISOTEST 1.	126
4.14 Création des cylindres de protection	127
4.15 Projection 2D de l'approche utilisée pour le calcul du facteur de correction (F_c).	127
4.16 Luminance de la source utilisée (loi de PLANCK).	128
4.17 Présentation du banc d'essai conçu.	129
5.1 Évolution de l'irradiation solaire durant la séquence expérimentale	132
5.2 Évolution de la vitesse et de la direction du vent à 2m durant la séquence expérimentale	132
5.3 Évolution de la température d'air et des précipitations durant la séquence expérimentale	133
5.4 Évolution de l'humidité relative durant la séquence expérimentale	133
5.5 Arrosage automatique sur les bacs végétalisés ($PCV_{ce}^{T_e}$) en fin de journée.	134
5.6 Évolution du champ thermique au sein du substrat au cours de la journée.	134
5.7 Évolution des températures et flux associés sous le substrat.	135
5.8 Évolution du champ thermique au sein des échantillons au cours de la journée ($PCV_{ce}^{T_h}$).	137
5.9 Évolution des températures et flux au contact de la tôle.	137
5.10 Les ISOTEST utilisées pour l'étude de la $PCV_{ce}^{T_h}$	138
5.11 Les ISOTEST : impact d'une PCV de type ligneux ($PCV_{Lsa}^{T_h}$).	139
5.12 Évolution du champ thermique au sein des échantillons au cours de la journée ($PCV_{Lsa}^{T_h}$).	140
5.13 Évolution des températures et flux au contact de la tôle.	140
5.14 Évolution des températures en face interne du plâtre.	142
5.15 Champs thermiques en surface des ISOTEST par un ciel clair (12h).	143
6.1 Intensité des flux thermiques dans les échantillons pour une journée type de classe 1.	147

6.2	Flux thermiques présents dans la lame d'air de chacun des échantillons pour une journée type de classe 1.	148
6.3	Répartition des flux thermiques dans les échantillons pour une journée type de classe 1 (pour une irradiation CLO brute $> 150 W.m^{-2}$), unités arbitraires.	148
6.4	Évolution circadienne des facteurs de transmission pour une journée type de classe 1 – le 2 mars 2015.	151

IV Modélisation et Simulation

1.1	Les types de maillages	164
1.2	Le maillage utilisé	164
2.1	Genèse de la PCV _H générique étudiée	168
2.2	Les phénomènes en présence considérés dans la PCV _H étudiée.	169
3.1	Formalisme des transferts thermiques considérés à travers une paroi simple bicouche.	177
3.2	Approche CL type Nld	178
3.3	Modèle simplifié	181
3.4	Modèle multi-réfectif pour des milieux M ₁ et M ₂ semi-transparents	181
3.5	Algorithme de résolution associé au modèle de tracé de rayon	182
3.6	Formalisme des transferts hydriques et hygriques considérés à travers une paroi bicouche.	183
4.1	Approche conceptuelle des cas d'études (en toiture des modules ISOTEST).	198
4.2	Analogies thermo-électrique associées aux cas d'étude tôle et substrat.	206
4.3	Analogies thermo-hygro-hydro-électrique associées aux cas d'étude PCV _{ce} Th et PCV _{Lsa} Th	207
5.1	Synoptique fonctionnel d'ISOLAB.	211
5.2	Interface d'accueil d'ISOLAB intégrant les modules développés.	212
5.3	Algorithmes de résolution sous ISOLAB.	215
5.4	Algorithme associé aux solveurs sous ISOLAB.	216
5.5	Synthèse des notions utilisées pour la gestion des systèmes oscillants	217
	(a) Exemple d'un schéma convergent, symétrique, de fréquence 4.	217
	(b) Exemple d'un schéma permanent, symétrique, de fréquence 2.	217
	(c) Exemple d'un schéma divergent, non symétrique, de fréquence 3.	217
5.6	Algorithme associé au module de la gestion des oscillations.	217
6.1	Interface de PCVBÂT.	219
6.2	Algorithme de simulation d'ISOLAB intégrant PCVBÂT.	220
7.2	Température sous la tôle simulée par ISOLAB et PCVBÂT.	222
7.1	Composition et indicateurs associés au cas d'étude.	222
7.3	Données météorologiques du 25 au 26/02/2015 utilisées pour la simulation.	223
7.4	Simulation du comportement thermique des ISOTEST les 25 et 26/02/2015.	227
7.5	Comportement thermique expérimental des ISOTEST les 25 et 26/02/2015.	228
7.6	Comparaison des grandeurs mesurées et simulées pour l'ISOTEST 1 (substrat).	233
7.7	Comparaison des grandeurs mesurées et simulées pour l'ISOTEST 2 (PCV _{ce} Th).	234
7.8	Comparaison des grandeurs mesurées et simulées pour l'ISOTEST 3 (tôle).	235

7.9	Comparaison des grandeurs mesurées et simulées pour l'ISOTEST 4 ($PCV_{Lsa}^{T_h}$).	236
7.10	Confrontations Modèle-Mesure des températures au niveau des tôles des ISO-TEST 1 et 2	238
7.11	Confrontations Modèle-Mesure des températures au niveau des tôles des ISO-TEST 3 et 4	239
7.12	Variation des humidités relatives au niveau des surfaces des $PCV_{ce}^{T_h}$ et $PCV_{Lsa}^{T_h}$.	240
7.13	Comparaison horaire des profils de températures mesurées et simulées pour l'ISOTEST 1 : substrat.	241
7.14	Comparaison horaire des profils de températures mesurées et simulées pour l'ISOTEST 1 : substrat (suite).	242
7.15	Comparaison horaire des profils de températures mesurées et simulées pour l'ISOTEST 2 : $PCV_{ce}^{T_h}$	243
7.16	Comparaison horaire des profils de températures mesurées et simulées pour l'ISOTEST 2 : $PCV_{ce}^{T_h}$ (suite).	244
7.17	Comparaison horaire des profils de températures mesurées et simulées pour l'ISOTEST 4 : $PCV_{Lsa}^{T_h}$	245
7.18	Comparaison horaire des profils de températures mesurées et simulées pour l'ISOTEST 4 : $PCV_{Lsa}^{T_h}$ (suite).	246

VII Annexes

B.1	Topologie de l'île de La Réunion.	1
B.2	Position géographique de l'île de La Réunion et du site expérimental.	2
C.1	Illustration des différentes PCV classiques	2
C.2	PCV_l^{45}	2
C.3	PCV_{ls}^{45}	2
C.4	PCV_{lsa}^{45}	2
D.1	Le cliché traité pour l'obtention de FF_{vc} et son obtention (Isotest 4).	2
D.2	Mesure de l'émissivité en la surface d'une feuille	3
D.3	La chaîne d'acquisition câblée.	5
D.4	Les thermoanémomètres dans la canopée.	5
D.5	Numérisation des feuilles	5
D.6	Corrélations entre longueur, largeur et surface pour les feuilles de <i>Tristellateia Australasiae</i>	7
D.7	Le ceptomètre et sa mise en œuvre pour la <i>Tristellateia australasiae</i>	7
D.8	Valeur du LAI de la <i>Tristellateia australasiae</i> pour l'une des cinq journées.	9
D.9	Évolution circadienne moyenne de la transmittivité et de la correction associée à la canopée (influence de la directionnalité du rayonnement).	9
D.10	Comparaison des flux transmis simulés et mesurés à travers la canopée de la <i>Tristellateia australasiae</i>	9
D.11	Évolution du LAD en fonction de l'épaisseur de canopée considérée	10
D.12	Caractéristiques radiatives chromatiques des feuilles	11
(a)	<i>Tristellateia Australasiae</i>	11
(b)	<i>Zoysia Tenuifolia</i>	11
F.1	Conceptualisation des transferts convectifs dans la canopée.	3
F.2	Algorithme du calcul des sollicitations solaires de type CLO sur une paroi d'orientation et d'inclinaison quelconques	4

G.1	Algorithme associé au fichier d'appel générique des fichiers de modèles. . . .	6
G.2	Algorithme d'exécution des fichiers de modèles.	7
G.3	Algorithme de création des fichiers de modèles.	7
G.4	Aperçu des onglets principaux de l'interface de PCVBÂT.	10
(a)	Description géométrique et outils	10
(b)	Les modèles des couches et d'interfaces	10
(c)	Les variables associées aux matériaux et aux modèles	10
I.1	Représentation schématique de la composition d'une PCV _H (crédit CSTC NIT)	3

Annexes

« *Felix qui potuit rerum
cognoscere causas* »

VIGILE (GÉORGIQUES, II, 489)

Sommaire des Annexes

A	Contexte historique, politique et environnemental	A - 1
1	État des lieux	A - 1
2	19 ^{ième} siècle : défi sanitaire	A - 1
3	20 ^{ième} siècle : défi énergétique	A - 1
4	21 ^{ième} siècle : défi environnemental et énergétique	A - 2
B	Précipitation et Rayonnement à l'île de La Réunion	B - 1
1	Présentation de l'île de La Réunion	B - 1
2	Conditions locales : la ville de Saint-Pierre	B - 2
3	Précipitations à l'île de La Réunion	B - 2
4	Rayonnement global à l'île de La Réunion	B - 3
C	Les PCV classiques et ligneuses	C - 1
1	Les PCV classiques	C - 1
2	Les PCV ligneuses	C - 2
D	Acquisition spécifique des paramètres physiques	D - 1
1	Facteurs d'environnement et de voute céleste	D - 1
2	Emissivités	D - 3
3	Vitesse de vent dans la canopée	D - 4
4	Étude des feuilles de <i>Tristellateia Australasiae</i>	D - 5
5	Densité foliaire (LAI)	D - 7
6	Réflectance	D - 11
E	Méthode d'homogénéisation	E - 1
F	Modèles physiques	F - 1
1	Convection	F - 1
2	Rayonnement	F - 3
3	Condensation	F - 6
G	Création de PcvBât	G - 1
1	Génèse	G - 1
2	Structure et algorithmes	G - 2
3	Interfaçage	G - 9
H	Apports à Isolab	H - 1
I	Communication sur les toitures végétalisées à La Réunion	I - 1
J	Regard croisé sur les PCV_{ce} à La Réunion et à Hong-Kong	J - 1

Section A

Contexte historique, politique et environnemental

Dans l'optique de préciser l'origine du cadre contextuel dans lequel s'effectue les travaux de thèse, la présente annexe décrit le contexte sous sous un angle macroscopique, approchant ce dernier du point de vue historique, politique et environnemental.

1 État des lieux

Durant le premier quart des années 1800, une effervescence particulière traverse l'occident. À cette époque l'Angleterre, l'Allemagne, les États-Unis d'Amérique puis la France et l'Italie s'industrialisent. Les évolutions scientifiques, économiques, sociales (*etc.*) induites par l'essor technologique provoquent, à long terme, un changement drastique du mode de vie pour la population. Dans ce contexte multi-évolutif aux cinétiques exponentielles, ces modifications amplifient alors les problématiques citadines séculaires et en créent de nouvelles. En effet, depuis lors, l'exode rural associé à l'évolution des conditions de vie a successivement soulevé divers écueils d'ordre sanitaire, énergétique et environnemental. Certaines de ces problématiques sont toujours d'actualité aujourd'hui.

2 19^{ième} siècle : défi sanitaire

Suite à la révolution industrielle, la qualité sanitaire et environnementale des villes s'est considérablement dégradée. Principalement dû à l'exode rural, les cités se sont densifiées, provoquant de fortes inerties thermiques et reléguant la nature au statut de privilège (à travers quelques parterres ou pots de plantes fleuries). Pour faire face à l'insalubrité, les hygiénistes ¹ préconisent la mise en place de nouveaux plans d'urbanisations et des politiques de gestion des déchets. Ces actions furent notamment entreprises par le Baron G.E. HAUSMANN ² et Eugène POUBELLE ³, respectivement.

1. Les théories hygiénistes sont apparues essentiellement suite aux découvertes de Louis PASTEUR (1865) sur le rôle des bactéries et des microbes dans la contamination des maladies humaines. Les théories hygiénistes ont révolutionné les sociétés occidentales, développant les réseaux d'égouts, le traitement des eaux usées, le ramassage des détritux, la prophylaxie ou encore la lutte contre la tuberculose.

2. Préfet du département de la Seine durant le Second Empire (de juin 1853 à janvier 1870).

3. Préfet du département de la Seine durant la Troisième République (de 1883 à 1896).

3 20^{ième} siècle : défi énergétique

Dès les années 1900, la production et la consommation de masse associées à l'évolution technologique induisent un besoin en énergie toujours croissant. Basé traditionnellement sur les énergies fossiles, les villes⁴ se modernisent et font le choix de l'électricité ; dont la production est permise par des centrales thermiques, mais également nucléaires dès 1950 en France métropolitaine. Dans ce contexte, les chocs pétroliers de 1973, puis de 1979 mettent en exergue deux notions capitales : le caractère limité des réserves de pétrole et la dépendance énergétique des nations industrialisées. Face à cette situation sans précédent, diverses pistes furent adoptées : développer de nouvelles technologies afin d'accéder aux réserves fossiles jusqu'alors inaccessibles, accentuer le développement du nucléaire civil ou encore développer des sources d'énergies alternatives (dites renouvelables).

Vis-à-vis de la population, les pénuries d'essences génèrent une (brutale) prise de conscience, quant à la nécessité de réduire la consommation énergétique. Mais cette dernière est temporaire, elle sera globalement rapidement négligée. Toutefois, le prix du baril de pétrole augmentant, des actions concrètes ont été entreprises. Certaines pratiques furent étudiées afin de devenir moins énergivores ; la diminution de la consommation en carburant des voitures⁵ en est un exemple. Cependant, d'autres pratiques furent encadrées légalement. C'est le cas de la construction immobilière, encadrée par la réglementation thermique⁶ dès 1974.

4 21^{ième} siècle : défi environnemental et énergétique

La fin du 20^{ième} siècle et le début du 21^{ième} siècle furent marqués par une prise de conscience : les activités humaines transforment l'environnement de manière notable et irrémédiable. Au delà ce constat, l'origine de l'intérêt international pour cette problématique provient d'une crainte fondée : celle d'un impact environnemental néfaste et planétaire. En effet, pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, l'impact anthropique sur la nature pourrait influencer négativement sur ses habitus à l'échelle mondiale, diminuant notamment sa qualité de vie. Ceci principalement à travers l'augmentation des problématiques sanitaires, mais aussi via la limitation de l'accès aux ressources et autres denrées, ou l'inondation des deltas, provoquant des flux migratoires massifs.

En ce sens, considérant les impacts, la plus grande menace est l'accélération de la cinétique du changement climatique (principalement dû à la production anthropique de gaz à effets de serre). Ce sujet fut le thème de nombreuses conférences scientifiques et autres sommets dans lesquels participent dirigeants et chefs d'État. Des résolutions furent alors prises dans le but de limiter l'impact anthropique sur la nature. Au niveau mondial, le premier accord caractéristique est le protocole de Kyoto⁷. Celui-ci a été traduit au niveau Européen sous la forme du « Paquet Climat Énergie », puis intégré au droit Français par le biais d'arrêtés et de directives. Afin de respecter les engagements pris, une concertation nationale a eu lieu dès 2007 : le Grenelle de l'environnement⁸. À noter que toutes ces décisions politiques se répercutent naturellement aux

4. Cette « révolution » est amorcée dans les années 1930 dans les grandes villes, mais n'arrive qu'après la seconde guerre mondiale dans les villages Français.

5. Dans des proportions différentes selon les états.

6. En ce qui concerne le domaine du bâtiment, la stratégie développée par l'état français, afin de faire face au défi énergétique, est de type législatif. Dès 1974 la première réglementation thermique (RT1974) est appliquée en France métropolitaine. Le but étant d'imposer l'isolation thermique afin de limiter les importants besoins en énergie associés au chauffage. Se succède ensuite plusieurs versions de cette réglementation : RT1988, RT2000, RT2005, RT2012. Étant donné l'attention à la ventilation, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage. En 2010 cette politique d'extension a été exprimée géographiquement ; la réglementation thermique a été adaptée aux départements d'outre-mer à travers la RTAA-DOM¹².

7. Lors du protocole de Kyoto signé en 1997, la France s'est engagée à stabiliser ses émissions de gaz à effet de serre sur la période 2008-2012 à leur niveau de 1990.

8. Il s'étend de 2007 à 2012, la première loi a été publiée début août 2009 redéfinissant les orientations

échelles subalternes. Au niveau national⁹, elles prennent la forme de directives, d'arrêtés, mais également de lois, de normes et autres incitations fiscales. Alors qu'au niveau régional, départemental et local cette répercussion apparaît dans les politiques menées, sous forme d'incitations économiques, de contraintes administratives ou à travers les infrastructures développées (*etc.*).

nationales pour accélérer la diminution de la consommation énergétique par un facteur 4.

9. Citons en France la loi sur l'interdiction des décharges publiques, la norme ISO-9001 et le crédit d'impôt associé à l'installation de panneaux solaires par exemple.

Section B

Précipitation et Rayonnement à l'île de La Réunion

1 Présentation de l'île de La Réunion

L'île de La Réunion est une île volcanique de point chaud¹ située aux coordonnées (21°34 S, 55°49' E), donc au large de Madagascar dans l'océan Indien (fig. B.2). Avec une altitude culminante à plus de 3070 m, l'île est montagneuse et soumise aux brises thermiques (venant des hauteurs en matinée et de la mer en soirée), ainsi qu'aux vents provenant de l'antarctique (influant sur la nébulosité et donc sur l'irradiation et les précipitations). Ce relief abrupt induit également une variation du climat, qui est considéré tropical humide de [0;300] m et tempéré au-delà de 300 m. À noter que La Réunion possède plus de 200 micro-climats, ce qui en fait le territoire en possédant la plus grande densité au monde.

Les conditions climatiques observées sont très fortement corrélées au relief. La figure B.1 en précise la topologie [VILLENEUVE et BACHÉLERY, 2006]. L'île de La Réunion se distingue notamment par la présence de deux massifs volcaniques (dont un actif) occupant son centre. Ils forment un col à 2000 m d'altitude, voie privilégiée pour le transfert des masses nuageuses, après épanchement sur la face est. La zone éruptive est indiquée par le cercle hachuré.

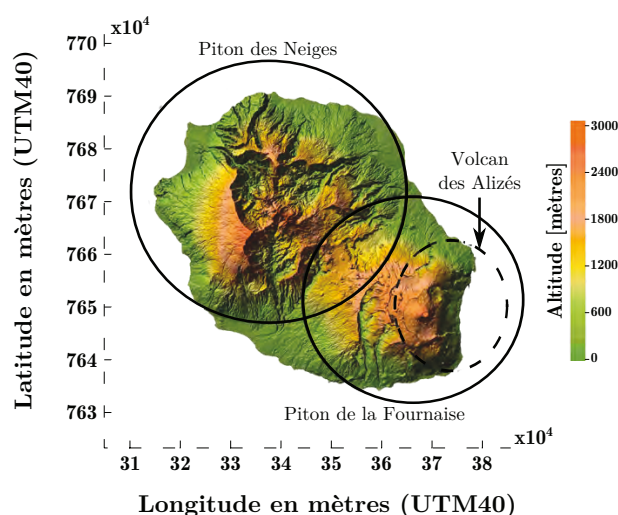


Figure B.1 – Topologie de l'île de La Réunion.

1. Volcan connu pour son activité. Grâce à la dérive des plaques tectoniques, il a formé les Laquedives, les Maldives, les îles Chagos et les Mascareignes. Mais il est surtout connu pour avoir émis 512 000 km³ de magma il y a 65 millions d'années, couvrant 1,5 million de km² avec une épaisseur de plusieurs kilomètres, créant ainsi la province des Trapps du DECCAN, lorsque l'Inde était à l'emplacement de l'île de La Réunion.

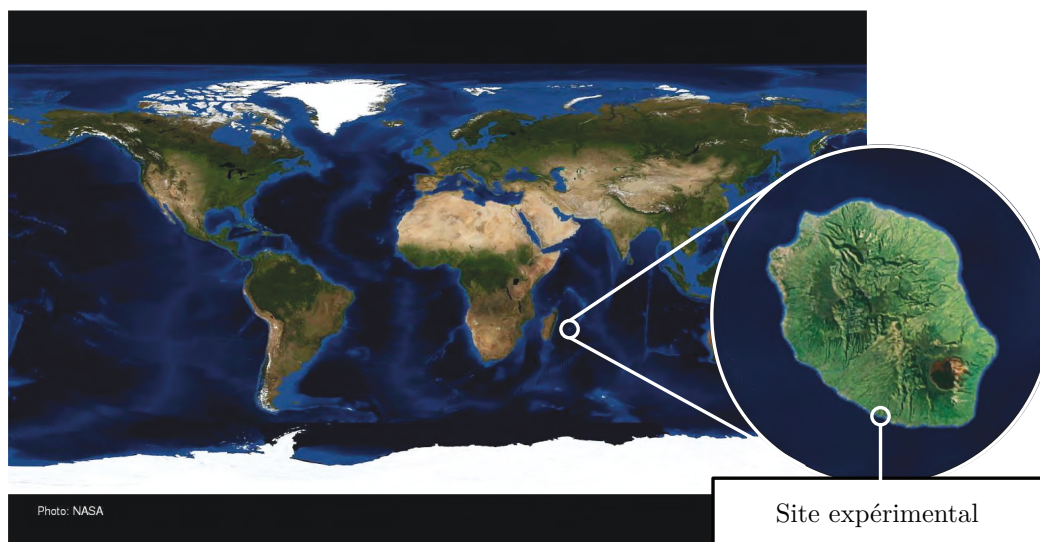


Figure B.2 – Position géographique de l'île de La Réunion et du site expérimental.

2 Conditions locales : la ville de Saint-Pierre

Les données présentées ont été récoltées durant l'année 2011 à Saint-Pierre de La Réunion, sur le site de l'IUT. Localisé au sud-sud-ouest de l'île ($21^{\circ}34'10''$ S, $55^{\circ}49'00''$ E), cet emplacement est situé à une altitude de 70 m (fig. B.2). Proche de la côte, le site est soumis aux brises thermiques (venant des hauteurs en matinée et de la mer en soirée) ainsi qu'aux vents provenant de l'antarctique. Cette position, associée au relief et à l'insularité, induit un microclimat particulier défini en moyenne par une humidité conséquente, un fort ensoleillement et des épisodes de vents² fréquents (donc présence d'embruns salins). À noter que durant cette période aucun cyclone n'est passé sur l'île.

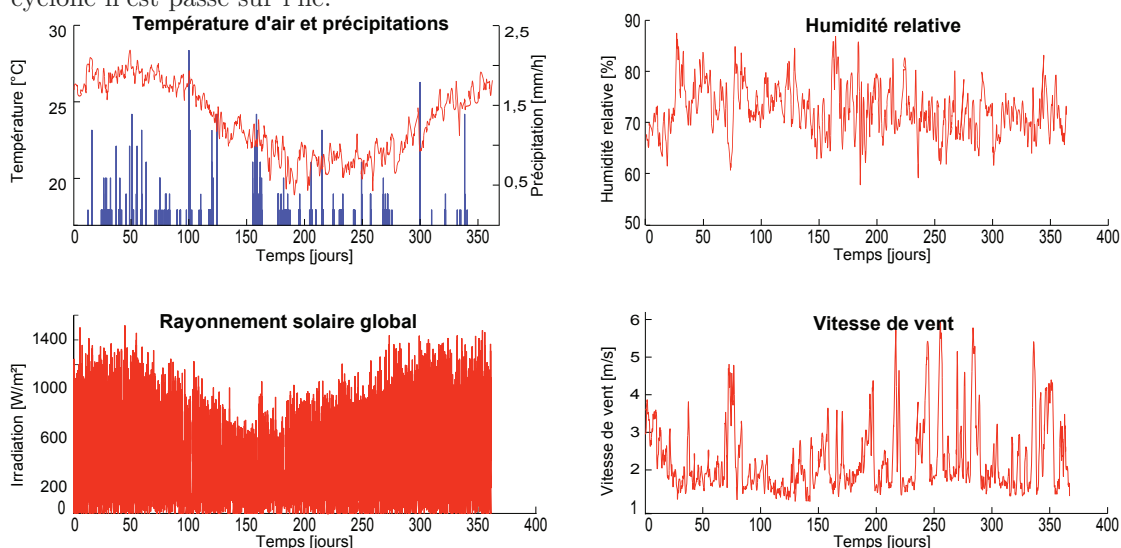


Table B.1 – Sollicitations météorologiques du 1er janvier au 31 décembre 2011.

2. Même en dehors de la saison cyclonique.

3 Précipitations à l'île de La Réunion

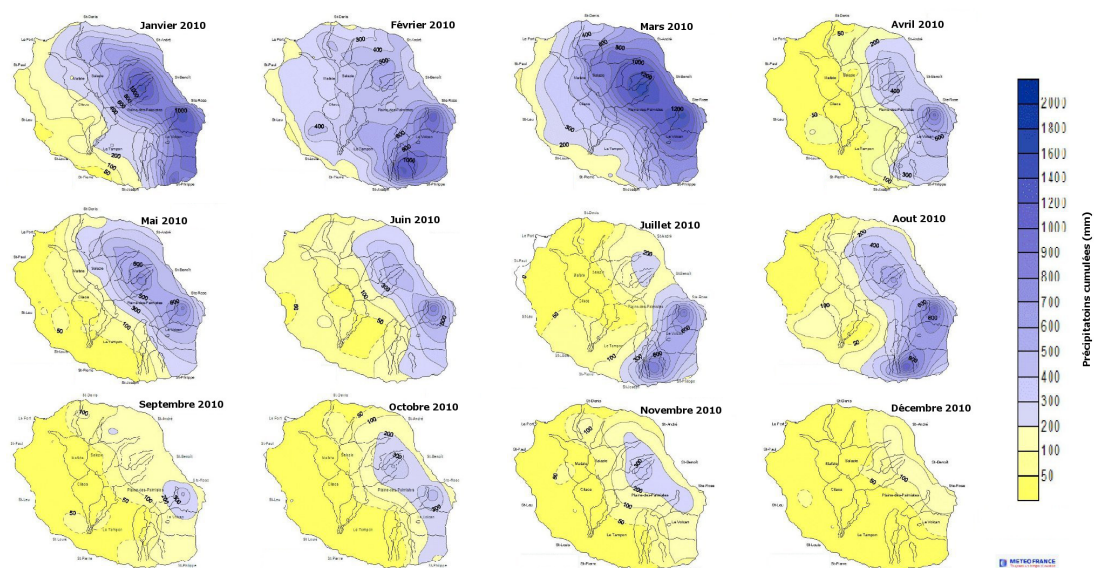


Table B.2 – Évolution des moyennes mensuelles concernant les précipitations pour l'année 2010 à l'île de La Réunion. Source : Météo France, clichés assemblés.

4 Rayonnement global à l'île de La Réunion

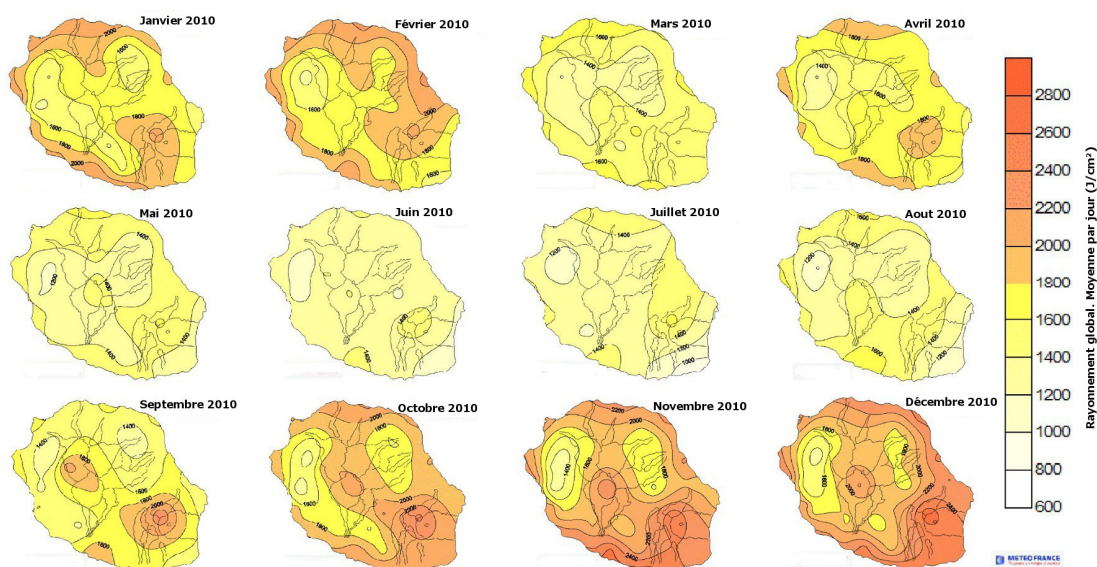


Table B.3 – Évolution des moyennes mensuelles concernant le rayonnement global pour l'année 2010 à l'île de La Réunion. Source : Météo France, clichés assemblés.

Section C

Les PCV classiques et ligneuses

Les Parois Complexes Végétalisées sont une notion, un concept permettant d'établir un cadre, une définition et une nomenclature pour toutes les parois contenant en leurs seins un végétal vivant (Cf. section 1 du chapitre II). Parmi la multitude des possibilités conceptives, deux approches ont retenu notre attention durant cette thèse, les PCV dites « classiques » et « ligneuses ». La présente annexe définit succinctement ces deux types de PCV.

1 Les PCV classiques

Les PCV traditionnelles, sont connues depuis les temps immémoriaux par diverses civilisations tout autour du globe. Issues des PCV traditionnelles, les PCV classiques (communément appelées toitures végétales) sont au nombre de trois : PCV_{ci} , PCV_{cs} et PCV_{ce} . Leurs propriétés sont indiquées par la table C.1.

TABLE C.1 – Propriétés des PCV classiques [ADIVET et al., 2007]

Nomenclature	PCV_{ce}	PCV_{cs}	PCV_{ci}
Nom	Classique Extensive	Classique Semi-intensive	Classique Intensive
Type de végétation	Rase	Arbustes	Toute végétation
Type de substrat	Substrat léger	Substrat léger	Terre
Épaisseur du substrat	4 à 15 cm	12 à 30 cm	> 30 cm
Charge ¹ (daN/m^2)	60 à 180	150 à 350	> 600
Angle maximal traditionnel ²	30°	20°	5°
Document de référence	[ADIVET et al., 2007]	[ADIVET et al., 2007]	DTU 43.1

Nota : cette classification est théorique, dans la réalité le passage d'une catégorie à une autre se fait progressivement (notion d'échelle continue et non discrète).

1. La charge indiquée tient compte de la teneur maximale en eau.

2. L'angle indiqué correspond aux angles maximaux couramment observés. Considérant les descentes de charges et les risques de mouvements du substrat, ces angles sont rarement dépassés lors de conceptions structurales traditionnelles.

Pour information, les plus étudiées et les plus employées sont les PCV classiques extensives, puis les semi-intensives et enfin très peu d'études portent sur les PCV de type intensifs.

La représentation schématique des différents types de PCV classiques est quant à elle présentée par la figure C.1.

Les phénomènes de transferts thermiques et massiques inhérents à la PCV_{ce}^{Th} sont présentés³ par les figures 2.9 et 2.10 de la section 2 du chapitre II.

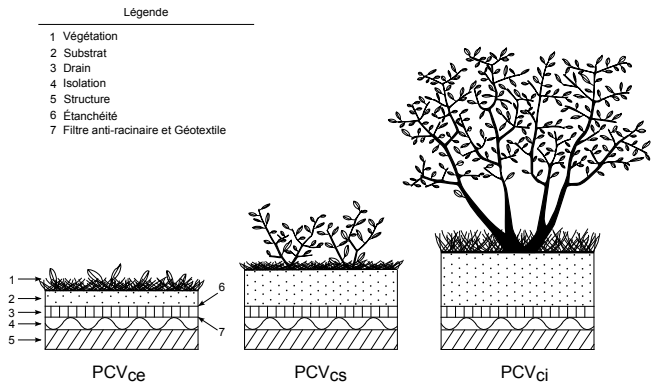


Figure C.1 – Illustration des différentes PCV classiques

2 Les PCV ligneuses

Les PCV ligneuses (PCV_l) représentent un sous-ensemble du domaine des PCV dont la végétation a la propriété d'avoir la capacité de s'étendre loin du lieu d'enracinement. Les plantes grimpantes, rampantes et autres lianes constituent cette végétation.

À partir de cette description, une multitude de compositions de parois végétalisées peuvent être définies. Les cas suivants décrivent les compositions les plus communes :

PCV_l La PCV ligneuse (ex : Fig. C.2) définit une végétation dont l'enracinement est effectué en dehors de la paroi la supportant. La structure porteuse étant sans impact thermique, celle-ci est négligée.

PCV_{ls} La PCV ligneuse sur structure (ex : Fig. C.3) définit une PCV similaire à la précédente (PCV_l), pour laquelle la structure est considérée (car elle induit un impact thermique).

PCV_{lsa} La PCV ligneuse sur structure et lame d'air (ex : Fig. C.4) définit une PCV_l dont la structure est considérée et possédant une lame d'air entre la structure et la végétation.

À l'heure actuelle aucune norme, réglementation, ou législation n'est adaptée à ce type de PCV. *Nota* : Les phénomènes de transferts thermiques et massiques inhérents à la PCV_{lsa} sont présentés³ par la figure 1.9 de la section 1 du chapitre II.

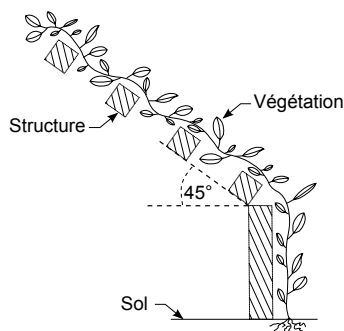


Figure C.2 – PCV_l^{45}

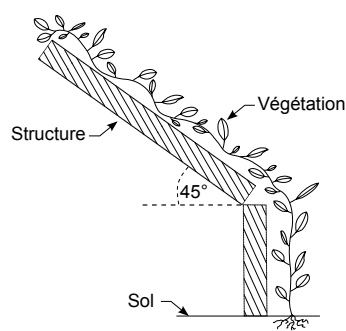


Figure C.3 – PCV_{ls}^{45}

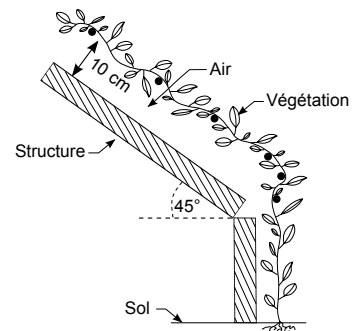


Figure C.4 – PCV_{lsa}^{45}

3. La signification des symboles est indiquée dans la nomenclature page xxvii.

Section D

Acquisition spécifique des paramètres physiques

Lors de l'exploitation des données expérimentales ou de la simulation, de nombreux paramètres sont requis. Certains d'entre eux sont présents dans la littérature, mais d'autres nécessitent une mesure spécifique. Celle-ci peut être due aux conditions expérimentales, aux spécificités du système étudié ou bien à une absence dans la littérature. L'objet de cette annexe consiste à présenter l'acquisition des principaux paramètres.

1 Facteurs d'environnement et de voute céleste

Tout corps ayant une température supérieure à 0°K émet un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est fonction de la température (loi de PLANCK). Cette caractéristique provoque un échange thermique entre un corps et son environnement. Le transfert radiatif inhérent est alors fonction (entre autres) du facteur de forme, un scalaire définissant le pourcentage du rayonnement émis atteignant le corps considéré. Dans notre cas, le champ vision depuis la toiture est considéré composé de deux éléments : la voute céleste et l'environnement. Les facteurs de forme à définir sont donc respectivement FF_{vc} et FF_{env} , définis tel que : $FF_{vc} + FF_{env} = 1$.

— Approche —

Considérant sa forme¹, le facteur d'environnement est délicat à obtenir, à cette fin le cheminement suivant a permis d'obtenir l'approche adéquate :

1. **Approche analytique : calcul simplifié.** Seul l'environnement proche est considéré (dans notre cas la haie), qui est approché par des plans rectangulaires formant des angles particuliers. Cette approche [MIRANVILLE, 2002] s'avère trop simplifiée dans notre cas, car ne prenant pas en considération le reste de l'environnement.
2. **Approche analytique : calcul détaillé.** L'environnement est alors considéré dans son ensemble. La complexité liée à la description de l'environnement associé à celle des calculs en fait une approche peu adéquate.
3. **Approche capteur-logiciel.** le facteur de forme est approché par le pourcentage d'un angle solide sur 2π stéradian. Il est alors défini via la mesure² des masques que forme

1. Présence de bâtiments à proximité et surtout d'une haie occupant une fraction du « champ de vision » possiblement important.

2. Il s'agit alors de mesurer sur 360° la valeur de l'azimut de la ligne dissociant l'environnement du ciel, via une observation depuis la toiture

chacun des éléments composant l'environnement tout autour de l'Isotest. Les données sont alors traitées numériquement³ afin d'obtenir l'angle solide associé.

Le relevé induit des approximations (point de mesure discret) possiblement source d'erreurs importantes et la génération du traitement numérique est lourd.

4. **Approche graphique.** Positionné sur la toiture (suivant l'angle souhaité), l'usage d'un objectif hémisphérique permet la projection sur le plan horizontal du rayonnement atteignant la surface de la demi-sphère. La toiture étant horizontale, cette transformation permet de linéariser (de normaliser) l'impact du rayonnement quelque soit les coordonnées de son origine. Le facteur de forme est ensuite obtenu par traitement graphique, il correspond au prorata de la somme des surfaces associées à l'environnement.

Cette approche permet une acquisition simple, rapide et précise de FF_{env} .

Parmi ces solutions, l'approche graphique a été utilisée. En l'absence de caméra ou d'appareil photo possédant un objectif hémisphérique, et celui-ci n'ayant pu être emprunté, la solution trouvée consiste à utiliser un TSI (total sky imager) emprunté à l'ESIROI CODE. Composé d'un miroir hémisphérique surmonté d'un appareil photo, celui-ci a été positionné en toiture afin d'acquérir les clichés souhaités. Un traitement graphique a ensuite permis de déterminer les surfaces associées à la voute céleste et à l'environnement. Rapportées à la surface du cliché (en pixels) ces données nous permettent alors d'obtenir FF_{vc} et FF_{env} , respectivement.

À noter que la simplicité inhérente à cette approche a également permis d'obtenir les facteurs de forme pour chacune des toitures des ISOTEST.

— Résultats —

Le traitement des clichés a permis d'obtenir les facteurs de formes ; dont FF_{vc} qui est explicité par le tableau D.1. À noter que la présence de la haie représente uniquement 15% de FF_{env} , validant ainsi le choix de la méthode utilisée.

Table D.1 – Les facteurs formes associés à la voute céleste

	Isotest 1	Isotest 2	Isotest 3	Isotest 4
FF_{vc}	0,58	0,57	0,56	0,55



Figure D.1 – Le cliché traité pour l'obtention de FF_{vc} et son obtention (Isotest 4).

3. Le traitement numérique associé est identique à une partie de celui implémenté pour la création des cylindres limitant le champ de vision des albedomètres (Cf. section 4 du chapitre III)

2 Emissivités

L'intensité du rayonnement électromagnétique émis par un corps est conditionnée par sa température, mais également son émissivité (ε). Dépendant de l'état de surface, cette grandeur caractéristique est fonction de la longueur d'onde (λ), toutefois sa valeur moyenne est utilisée en physique du bâtiment ($\varepsilon = \langle \varepsilon(\lambda) \rangle_\lambda \quad \lambda \in [5; 15] \mu m$).

2.1 Mesure : Surface supérieure de la tôle

— Méthodologie —

L'Isotest étant positionnée en environnement naturel, l'émissivité de la surface de sa tôle a dû être déterminée via une méthode *in situ*. À cette fin, un thermomètre infrarouge (OPTRIS LASERSIGHT a été utilisé (fig. D.2). Cette approche nécessite une température du matériau à minima 40°C supérieure à la température ambiante. La mesure a donc eu lieu par un jour⁴ de ciel clair, au midi solaire. La mesure consiste à prendre la température en surface d'un auto-collant (positionné sur la tôle) dont l'émissivité est connue⁵ puis à faire la même mesure sur la tôle à proximité. La température étant identique⁶ il est possible de régler l'appareil (ε) jusqu'à ce que les mesures correspondent. L'obtention de ε par cette approche peu s'avérer délicate, car la température ne doit pas évoluer, hors la manipulation prend du temps⁷.

— Résultats —

Suite aux mesures, il ressort que la tôle possède une émissivité de $0,84 \pm 0,01$. Cette valeur est cohérente considérant la couleur (bleu foncé) de la tôle. À noter qu'aux vues des risques d'erreur, ce paramètre sera considéré⁸ durant l'optimisation paramétrique.

2.2 Mesure : Surface des feuilles

— Méthodologie —

Pour la mesure de l'émissivité de la surface des feuilles de *Tristellateia Australasiae*, l'approche utilisée est basée sur la précédente. La différence réside dans les conditions de manipulation, due à l'obtention de la différence des 40°C nécessaire, et leurs conservations le temps de la mesure. À cette fin, les feuilles sont mises dans une l'étuve à 70°C durant 15 minutes, pour une température de sortie de 50°C. Une couverture est également présente dans l'étuve, elle permet ainsi, dès la sortie de l'étuve, d'assurer protection et inertie thermique. Pour finir, la mesure est faite dans une chambre froide (6,2°C), afin d'avoir les 40°C requis.

— Résultats —

4. Afin de limiter les perturbations, telles que la réflexion partielle du rayonnement IR incident sur la toiture, la zone observée est localement protégée par une barrière radiante.
5. Fourni par le constructeur, $\varepsilon = 0,95$.
6. Pour une distance de quelques centimètres, l'effusivité de la tôle d'acier est suffisante pour justifier cette affirmation.
7. À noter que la prise de mesure doit impérativement être protégée (barrière radiante) afin de limiter au maximum la perturbation de la mesure. De plus, une attention particulière à un éventuel rayon de courbure est impérative, car celui-ci perturbe la mesure.
8. Si l'analyse de sensibilité paramétrique le caractérise comme influent.



Figure D.2 – Mesure de l'émissivité en la surface d'une feuille

Suite aux mesures, il ressort que les feuilles possèdent une émissivité sur leurs surfaces (inférieure et supérieure) de $0,90 \pm 0,01$. La valeur obtenue est cohérente avec la littérature, dans laquelle les canopées ont des émissivités variant entre 0,90 et 0,98. Toutefois, aucune valeur n'ayant été trouvée dans la littérature pour cette plante, ce paramètre sera considéré⁸ durant l'optimisation paramétrique.

3 Vitesse de vent dans la canopée

Dans le but de modéliser la convection forcée dans la canopée, la vitesse de vent est nécessaire (Cf. eq. F.14 chapitre IV). Hors, celle-ci est impactée par la présence de la canopée. Afin de la modéliser le modèle proposé par PERRIER [1976] est utilisé : $v = v_0 e^{-D_{LAD}(z)}$.

— Approche —

Pour permettre de lancer une simulation, il est impératif d'avoir des paramètres au plus proche de la réalité physique du système étudié. À cette fin, une estimation des paramètres est effectuée via une séquence expérimentale. Pour ce faire, l'Isotest 4 est instrumentée durant une journée propice *i.e.* journée de type⁹ J1 possédant une vitesse de vent correspondant à la vitesse moyenne pour une journée classique (2 m.s^{-1}).

La chaîne d'acquisition est composée d'une centrale ALBORN ALMEMO 2890-9 effectuant un échantillonnage toutes les 15 sec des vitesses de vents obtenus par deux thermoanémomètres¹⁰ (notés $A_{t,1}$ et $A_{t,2}$), positionnés dans la lame d'air le long de la tôle (l'un en partie basse et l'autre en partie haute de la toiture). La vitesse de vent de référence (A_m) est obtenue via un anémomètre à moulinet positionné sur la station météorologique située à 6 m de l'Isotest. Les figures D.3 et D.4 présentent respectivement la chaîne d'acquisition et la disposition des thermoanémomètres dans la canopée.

— Traitement des données —

Une fois les données acquises se pose la question de la variabilité des phénomènes mesurés (observation des mêmes phénomènes). Afin de réduire l'influence de la variabilité, la solution retenue pour le traitement des données est le filtrage par moyenne mobile arithmétique de période P . Le critère utilisé pour définir la validité de l'exploitation des données est alors basé sur les coefficients de corrélation¹¹ associés à $C_{1,2} = f(A_{t,1}, A_{t,2})$, $C_{1,m} = f(A_{t,1}, A_m)$ et $C_{2,m} = f(A_{t,2}, A_m)$. Plus précisément, les données sont considérées suffisamment cohérentes lorsque, pour $P = 1 \rightarrow \infty$, ces coefficients de corrélations sont supérieurs à 0,75 et tendent vers une valeur fixe.

Il apparaît que pour des périodes P suffisamment importantes, les valeurs des coefficients de corrélations n'évoluent plus. La valeur de P choisie est alors la plus petite : 15 min, elle correspond aux coefficients de corrélation suivant : $C_{1,2} = 0,86$, $C_{1,m} = 0,81$ et $C_{2,m} = 0,78$.

— Résultats —

Les vitesses de vents dans la lame d'air sont faibles, elles valent en moyenne $0,18 \pm 0,02 \text{ m.s}^{-1}$, ce qui correspond à une perméabilité au vent de la canopée de $0,10 \pm 0,01$.

9. Type J1 : définit une journée estivale, caractérisée par un fort ensoleillement, pouvant atteindre 1000 W.m^{-2} et un vent faible ;

10. Capteur ALBORN, plage de fonctionnement : $[0;40]^\circ\text{C}$ pour une vitesse d'air de $[0,15;5,00] \text{ m/s}$.

11. Obtenu par la fonction `corrcoef` sous MATLAB.

Le $LAD(z)$ étant connu et la vitesse de vent extérieur V_0 étant mesurée en temps réel, le coefficient d'extinction peut être déterminé : il est de $0,0051 \pm 0,0012$.

Nota : ces résultats ne sont représentatifs que pour les conditions météorologiques et botaniques de l'expérimentation, mais suffisante pour le test du modèle.



Figure D.3 – La chaîne d'acquisition câblée.



Figure D.4 – Les thermoanémomètres dans la canopée.

4 Étude des feuilles de *Tristellateia Australasiae*

Dans l'objectif de caractériser la canopée de la *Tristellateia Australasiae* il est nécessaire de connaître diverses grandeurs géométriques. À l'échelle de la feuille, il s'agit de l'épaisseur et de la surface.

— Méthode —

Considérant la forme des feuilles, une approche destructrice a été choisie afin de permettre une mesure précise de leur surface. Pour cela, 100 feuilles ont été prélevées de manière aléatoire sur la canopée. Une fois leurs épaisseurs mesurées, elles ont été ensuite numérisées (fig D.5) en vue d'obtenir les largeurs, longueurs et surfaces de chacune d'entre elles. Le traitement numérique a été opéré à l'aide de l'excellent logiciel de traitement d'image GIMP¹². Pour cela, les surfaces ont été obtenues par sélection manuelle¹³ du contour de chacune des feuilles, donnant ainsi accès au nombre de pixels associés. La conversion pixel/mm² est permise par l'introduction au préalable d'une forme géométrique de surface connue lors de la numérisation. Il s'agit ici d'un carré de 20,0 mm de côté. Enfin, les longueurs et largeurs sont obtenues selon une approche similaire :



Figure D.5 – Numérisation des feuilles

12. GIMP : « GNU Image Manipulation Program ». Logiciel sous licence publique générale GNU.

13. L'approche manuelle permet d'adapter le contour en fonction des déformations apparues lors de la numérisation. Celles-ci sont dues à la géométrie tridimensionnelle des feuilles qui se replient lorsque le rabat du scanner leur impose la planéité. Replis visibles sur la figure D.5.

sélection manuelle pour chacune des feuilles, décompte du nombre de pixels, et conversion en mm.

— Résultats —

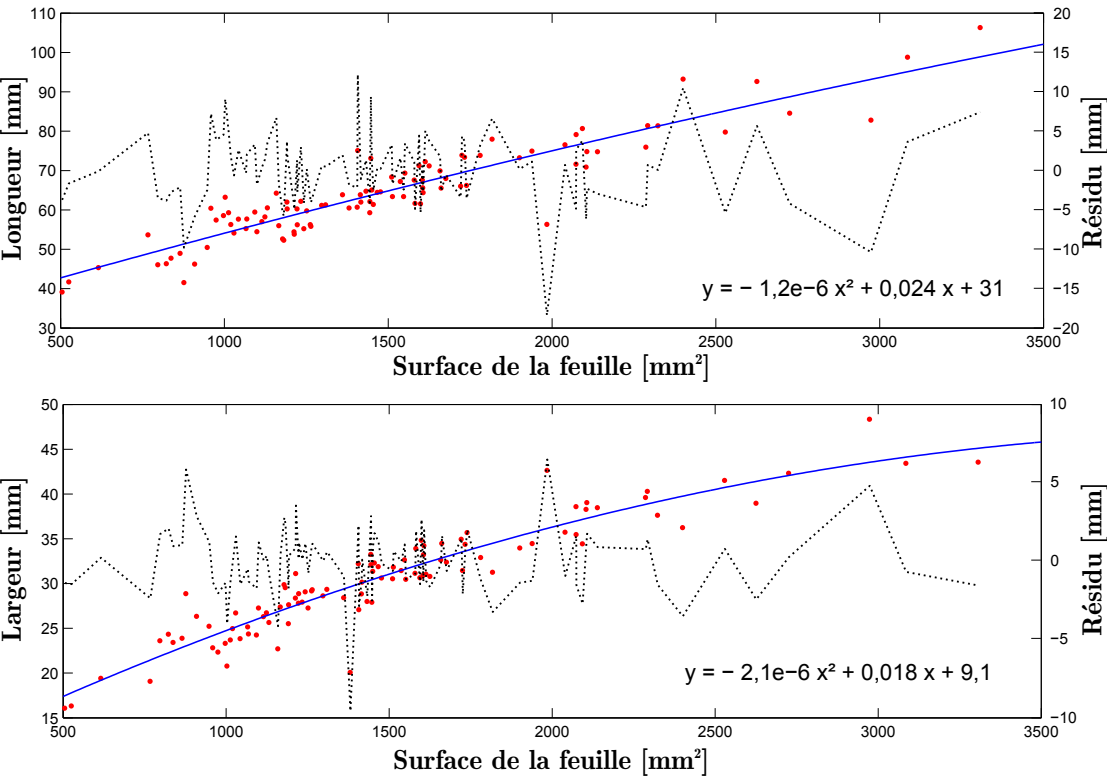
Le traitement numérique permet d’obtenir les moyennes indiquées dans le tableau D.2. Les intervalles de confiances indiqués représentent un niveau de confiance de 95%.

Table D.2 – Grandeurs géométriques associées aux feuilles de la *Tristellateia Australasiae*

Épaisseur	Surface	Longueur	Largeur
$4,5 \pm 0,22 \cdot 10^{-1} \text{ mm}$	$1495,6 \pm 105,5 \text{ mm}^2$	$64,4 \pm 2,33 \text{ mm}$	$30,5 \pm 1,20 \text{ mm}$

— Corrélations —

Par ailleurs, une recherche de corrélation entre largeur, longueur et épaisseur a été effectuée en vue de faciliter l’étendue de la campagne de mesure selon une approche non destructive. Les résultats obtenus sont présentés par la figure D.6.



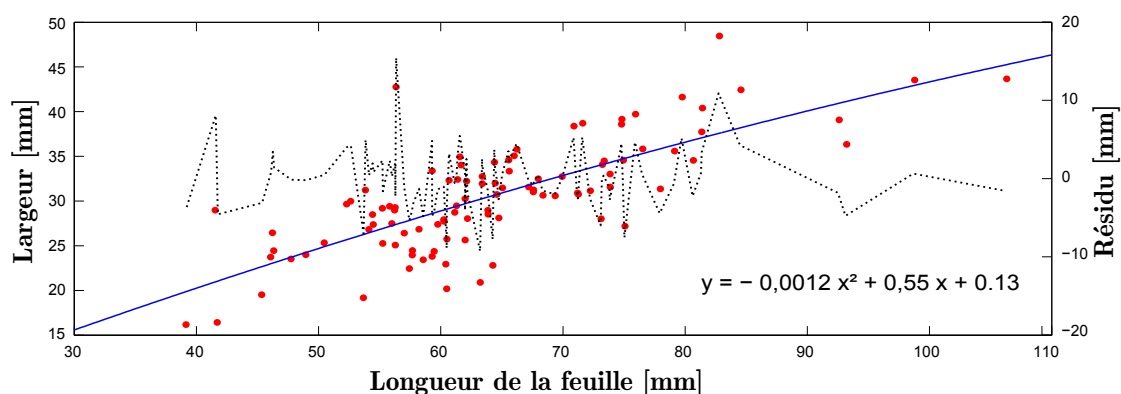


Figure D.6 – Corrélations entre longueur, largeur et surface pour les feuilles de *Tristellateia Australasiae*

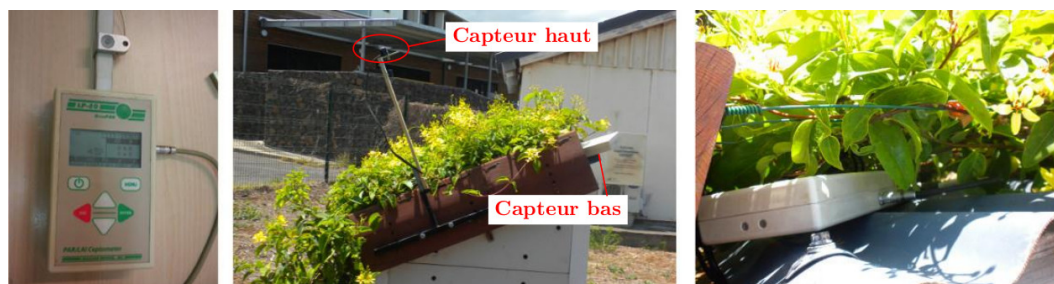
5 Densité foliaire (LAI)

Dans le cadre de notre étude, le LAI du *Zoysia tenuifolia* (gazon) et de la *Tristellateia australasiae* (liane) sont nécessaires. Considérant leurs canopées respectives deux approches différentes sont employées :

1. Pour ce qui est du gazon des Mascareignes, la présence de chlorophylle uniquement sur une portion de ses feuilles, associée à l'hypothèse d'opacité de la couche la représentant (due à sa densité), nous a poussé à estimer le LAI de manière théorique (Cf. eq. 3.78 section 3.4.1 du chapitre IV).
2. Pour la liane, considérant l'hétérogénéité de la canopée, une approche expérimentale a été choisie. Les paragraphes suivants en précisent l'acquisition.

— Acquisition des données —

Dans le but d'obtenir le LAI, un ceptomètre a été utilisé : il s'agit ¹⁴ d'un LP-80 du constructeur AccuPAR. Cet appareil permet de mesurer le rayonnement sur le spectre visible via deux capteurs, l'un au-dessus de la canopée et l'autre en dessous. Le rapport des deux mesures indiquant la transmissivité de la canopée. À noter que le capteur supérieur est composé d'une unique cellule (à l'instar d'un pyranomètre), alors que le capteur inférieur possède 60 cellules espacées de 1 cm. La moyenne de ces valeurs permet d'obtenir une mesure moyenne sous la canopée dont l'hétérogénéité induit une transmissivité non uniforme. Le ceptomètre et sa mise en œuvre sont visibles sur la figure D.7.



14. Le ceptomètre nous a gracieusement été prêté par le pôle élevage du CIRAD de Saint-Pierre.

Figure D.7 – Le ceptomètre et sa mise en œuvre pour la *Tristellateia australasiae*.

Une fois le ceptomètre configuré, la campagne de mesure a pu être lancée sur une période¹⁵ de 5 jours, avec un échantillonnage au pas de temps de la minute. Le LAI défini par l'appareil est présenté par la figure D.8 pour l'une des journées. Il est calculé via le modèle de NORMAN [1976] et utilise une version adaptée du modèle de CAMPBELL [1986] pour le calcul du coefficient d'extinction. En vue d'affiner le paramétrage du modèle afin qu'il corresponde aux conditions de l'expérimentation (ex : pente de la toiture), celui-ci a été implémenté. La valeur du LAI ainsi « recalculé » (également visible sur la figure) est dès lors plus proche de la valeur vraie.

— *Traitement des données* —

Par définition, le LAI est constant sur une journée au regard de l'échelle de temps biologique (développement des feuilles et de la canopée). Or, il apparaît que ce dernier évolue fortement d'après les mesures. L'évolution du LAI observé est due à l'hétérogénéité de la canopée, qui induit une transmittivité différente¹⁶ selon la direction du rayonnement direct. En vue d'obtenir un LAI constant, et donc supprimer l'impact de l'hétérogénéité de la canopée, le modèle¹⁷ de NORMAN [1976] est amendée par un coefficient de pondération noté β (eq. D.1). Par ailleurs, une formulation plus générique du coefficient d'extinction est utilisée (eq. 3.33, chapitre IV). Il s'agit d'un autre modèle de CAMPBELL [1986], plus adapté au type de canopée en présence.

$$\ln \tau = \frac{C_a (1 - 0,47\gamma) \beta \text{LAD}}{(1 - 1/2K)\gamma - 1} \quad (\text{D.1})$$

Aux vues des transmittivités circadiennes, β est un paramètre évolutif. Considérant l'origine de ce paramètre (considération/correction de l'hétérogénéité de la canopée), il est fait l'hypothèse¹⁸ que, pour une même nébulosité, sa valeur évolue de manière identique tous les jours. Ainsi, β est défini comme un vecteur horaire, constant sur la période observée et/ou simulée. L'obtention de β pour chacune des journées est fait par itération, répartissant les résidus issus du LAI obtenu comparativement au LAI souhaité¹⁹. Ensuite les cinq vecteurs horaires de β obtenus sont moyennés afin d'obtenir le vecteur horaire représentatif de la canopée.

À noter que le vecteur horaire obtenu correspond à une description spécifique de la canopée au moment de l'expérimentation. De plus, il s'avère que modélisation de β à partir de considérations géométriques serait possible, mais ne correspondrait pas à une approche semi-détaillée. Dans ce contexte, β est conservé sous forme de vecteur horaire dans un fichier dédié, lequel est appelé durant de la simulation d'une PCV $_{L_{sa}}^{Th}$ (pour le tracé de rayon).

15. Afin d'assurer la fiabilité du résultat, au regard de l'importance du LAI en tant que paramètre dans le modèle créé.

16. À noter que la période ou la variation est la plus faible correspond à un rayonnement majoritairement diffus (> 90%), cette remarque est corroborée par la littérature.

17. Les paramètres associés à cette équation sont explicités dans la section 3.2.3.2.2 du chapitre IV.

18. Cette hypothèse est basée sur l'hypothèse d'un faible impact de l'évolution saisonnière sur la transmittivité.

19. LAI souhaité : valeur moyenne du LAI par temps couvert.

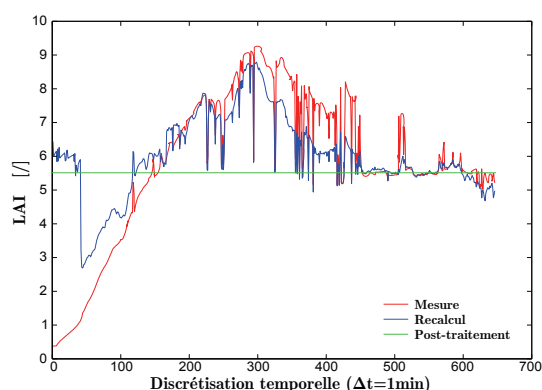


Figure D.8 – Valeur du LAI de la *Tristellateia australasiae* pour l'une des cinq journées.

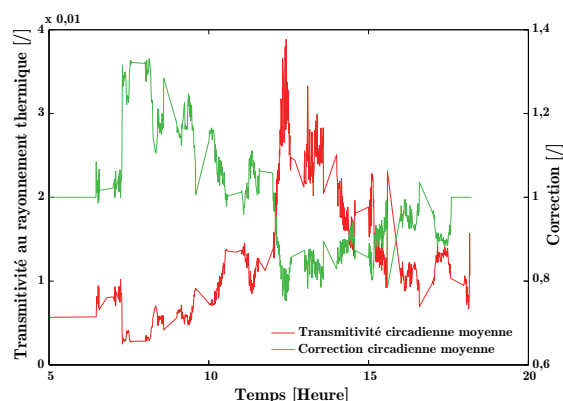


Figure D.9 – Évolution circadienne moyenne de la transmittivité et de la correction associée à la canopée (influence de la directionnalité du rayonnement).

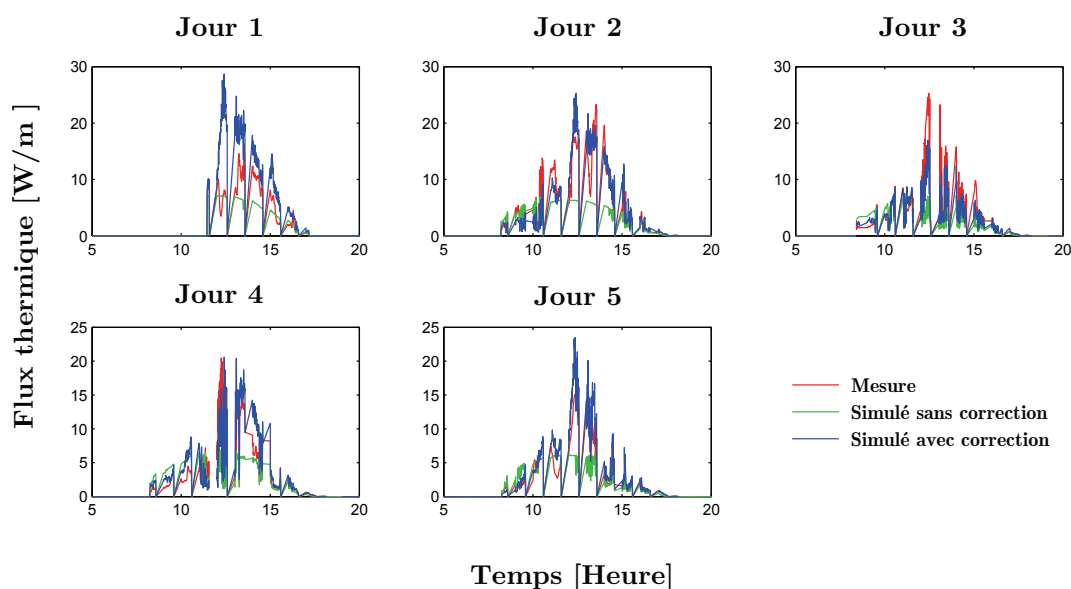


Figure D.10 – Comparaison des flux transmis simulés et mesurés à travers la canopée de la *Tristellateia australasiae*

— Résultats —

Pour chacune des journées expérimentées la correction effectuée permet d'obtenir un LAI constant grâce à la définition du vecteur horaire β . La valeur du LAI est :

LAI de la <i>Tristellateia Australasiae</i> :	5,65
---	------

Cependant, dû à des nébulosités différentes, les vecteurs sont d'allures sensiblement différentes. Il est donc nécessaire de vérifier la validité du vecteur β moyen défini et son association avec la valeur moyenne du LAI. À cette fin, les flux transmis mesurés sont comparés avec ceux simulés (avec et sans correction, *i.e.* β) à partir des flux incidents en surface de la canopée. Les résultats sont présentés par la figure D.10. Il apparaît une meilleure adéquation entre les flux mesurés et

simulés si la correction est utilisée.

Toutefois, au regard du Jour 1, l'adéquation est améliorable. Les erreurs observées proviennent en grande partie d'une sur/sous estimation du rayonnement transmis. Celui-ci semble être dû à la correction appliquée, qui ne distingue pas le taux de nébulosité (donc le rapport des rayonnements direct sur global : γ). Une solution serait, lors de la moyenne, de définir deux vecteurs β : β^d et β^D , respectivement associés au rayonnement diffus et direct, tel que : $\beta = \gamma\beta^D + (1 - \gamma)\beta^d$. Cette redéfinition affectant également β dans l'équation D.1.

Nota : dans notre étude, en première approche, la précision associée au vecteur horaire β sans prise en compte de la nébulosité est considérée comme suffisante. Ce choix est étayé par l'erreur du modèle issu du tracé de rayon associé ($\varepsilon < 8\%$).

— *Impact : LAD* —

La définition du LAI permet de définir la valeur du LAD (et par extension celle du $LAD_{\Delta z}$). Pour une canopée d'épaisseur h , sous l'hypothèse d'une distribution homogène des feuilles selon l'axe vertical, il est possible d'exprimer cette grandeur par l'équation D.2.

$$LAD = LAI \frac{e(z)}{h} \quad (D.2)$$

Conditionnée par la valeur du LAI, le LAD est donc fonction de l'épaisseur de canopée considérée (e). La transmittivité associée à cette épaisseur est illustrée par la figure D.11.

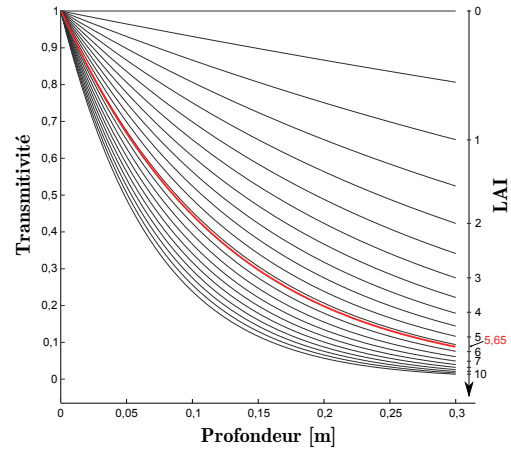


Figure D.11 – Évolution du LAD en fonction de l'épaisseur de canopée considérée et du LAI (pour une distribution uniforme des feuilles dans la canopée)

6 Réflectance

Dans le but d'obtenir les propriétés radiatives des feuilles des canopées observées (*Tristellateia Australasiae* et *Zoysia Tenuifolia*) une procédure²⁰ de spectrométrie a été employée. Pour cela des feuilles ont été prélevées, préparées et soumises à un rayonnement chromatique uniforme sur le spectre [350 ; 2500] nm. La réflectance chromatique moyenne observée (ρ , 25 mesures) est présentée par la figure D.12 avec la transmittance (τ) et l'absorptance (α).

La courbe de réflectance sur le spectre visible est caractéristique d'un végétal : le pic à 550 nm (vert) provient d'une plus forte absorptance autour des longueurs d'ondes {430 nm, 600 nm} et {450 nm 643 nm}, correspondant à la chlorophylle *a* et *b*.

À partir de ces données, il est ainsi possible d'extraire les paramètres radiatifs sur les spectres visibles ([350 ; 700] nm) et infrarouges ([700 ; 2500] nm). Ceux-ci sont présentés par les tableaux suivants :

Table D.3 – Caractéristiques radiatives des feuilles

(a) <i>Tristellateia Australasiae</i>				(b) <i>Zoysia Tenuifolia</i>			
Spectre	α	ρ	τ	Spectre	α	ρ	τ
[350 ; 700] nm	0,86	0,11	0,03	[350 ; 700] nm	0,87	0,10	0,03
]700 ; 2500] nm	0,69	0,28	0,02]700 ; 2500] nm	0,60	0,39	0,02

Nota : les valeurs obtenues pour la liane sont proches de celles obtenues par COHEN et FUCHS [1987] pour les feuilles d'un citronnier sur le spectre visible ($\alpha = 0,88$ $\rho = 0,09$ $\tau = 0,03$), mais différent pour α et τ sur le spectre infrarouge ($\alpha = 0,56$ $\rho = 0,27$ $\tau = 0,17$). Puisque d'aspect visuel les feuilles de la liane et du citronnier sont similaires, il est cohérent que les paramètres radiatifs le soient également. Ceci étant, aux vues des courbes, bien qu'ayant un comportement similaire, selon les plantes les amplitudes sur le spectre infrarouge évoluent plus fortement que sur le spectre infrarouge. La comparaison tend à valider les résultats obtenus.

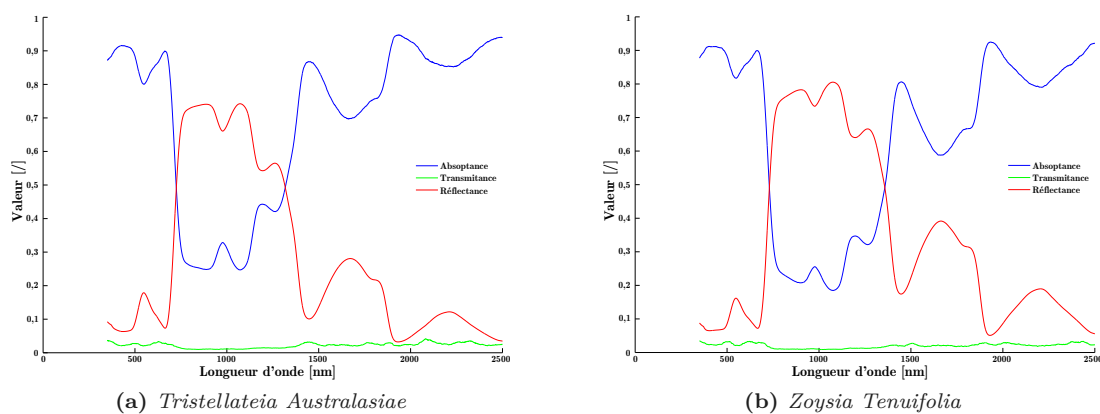


Figure D.12 – Caractéristiques radiatives chromatiques des feuilles

20. Procédure effectuée au pôle élevage du CIRAD de Saint-Pierre de La Réunion.

Section E

Méthode d'homogénéisation

Globalement, il existe 3 grands types de méthodes d'homogénéisation [MCHIRGUI, 2012] :

- l'homogénéisation par prise de moyenne ;
- l'homogénéisation périodique ;
- l'homogénéisation des milieux à microstructure aléatoire.

Considérant la finesse du modèle final nécessaire, nous utiliserons la méthode de l'homogénéisation par prise de moyenne. Comme toutes les méthodes d'homogénéisation, elle permet par la suite de définir la valeur effective ou équivalente des paramètres microscopiques du matériau (par exemple la conductivité thermique équivalente : λ^*). Appliquée à une grandeur microscopique notée « \bullet » la moyenne volumique est définie par :

$$\langle \bullet \rangle = \frac{1}{V} \int_V \bullet \, dV \quad (\text{E.1})$$

Elle est donc obtenue par intégration sur une valeur adéquate du volume élémentaire représentatif du matériau étudié (dV), lequel est fonction de l'échelle de l'homogénéisation souhaitée. L'homogénéisation est classiquement considérée comme performante si le rapport entre les échelles microscopique (*i.e.* avant homogénéisation : l) et macroscopique (*i.e.* après homogénéisation : L) est supérieur à dix ($L/l > 10$). D'une façon générale, plus le rapport d'échelle est important et meilleurs seront les résultats [MCHIRGUI, 2012].

Par ailleurs, les moyennes volumiques des opérateurs de dérivation spatiale (∇) et temporelle ($\frac{\partial}{\partial t}$) sont appliqués à cette grandeur par :

$$\langle \nabla \bullet \rangle = \nabla \langle \bullet \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_{fs}} \bullet \, \vec{n}_{fs} dA \quad (\text{E.2})$$

$$\langle \frac{\partial}{\partial t} \bullet \rangle = \frac{\partial}{\partial t} \langle \bullet \rangle - \frac{1}{V} \int_{A_{fs}} \bullet \, \vec{W} \cdot \vec{n}_{fs} dA \quad (\text{E.3})$$

Où A_{fs} définit la surface séparant dans le volume élémentaire représentatif les phases fluide et solide, \vec{n}_{fs} est le vecteur normal à l'interface A_{fs} orienté de la phase fluide vers la phase solide et \vec{W} correspond au vecteur vitesse de déplacement des points de l'interface A_{fs} , lorsque celle-ci varie (milieu déformable, écoulements multiphasiques).

Section F

Modèles physiques

1 Convection

Dans une approche nodale, les relations de type physiques semi-détaillées traduisant ces phénomènes sont basées sur l'équation de NEWTON (eq. F.1) qui dérive de la température, *i.e.* du gradient entre le fluide (T_f) et la surface considérée (T_s). Valide pour les transferts convectifs forcés et libres, l'adaptation de l'équation aux caractéristiques du milieu s'effectue via le choix de la valeur du coefficient d'échange : h_{cv}^t .

$$\varphi_{cv} = h_{cv}^t (T_f - T_s) \quad (\text{F.1})$$

1.1 Sur une paroi

En fonction du niveau de finesse souhaité, le coefficient d'échange convectif peut être approché par une corrélation basée sur une variable physique, tel que l'écart de température entre le fluide et la surface de paroi (eq. F.2), ou bien la vitesse du vent (eq. F.3), mais également par une corrélation adimensionnelle (eq. F.4 et F.5).

Variable physique

Adimensionnelle

Natuelle :	$h_{cv}^t = a(\Delta T)^b + c$	(F.2)	$h_{cv}^t = \lambda_{air} \cdot N_u(R_e, P_r)/L$	(F.4)
------------	--------------------------------	-------	--	-------

Forcée :	$h_{cv}^t = a + b(v + c)^d$	(F.3)	$h_{cv}^t = \lambda_{air} \cdot N_u(G_r, P_r)/L$	(F.5)
----------	-----------------------------	-------	--	-------

Avec $\{a, b, c, d\}$ des coefficients constants, v la vitesse du vent, L la longueur caractéristique et $\{N_u, R_e, P_r, G_r\}$ les nombres adimensionnels de NUSSELT, REYNOLDS, Prandtl et GRASHOF, respectivement.

Les travaux précédant notre étude ont défini des modèles convectifs adaptés à la configuration de l'ISOTEST de référence [MIRANVILLE, 2002]. Par conséquent, ceux-ci sont utilisés. Pour la convection externe, une relation basée sur la corrélation de STURROCK a été établie spécifiquement pour le lieu d'expérimentation :

$$h_{cv}^t = \begin{cases} 8 + 4,2v & \text{Si } D_{az} \in [150; 300] \text{ et } v \leq 2 \\ 11,4 + 5,7v & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{F.6})$$

Avec D_{az} la direction du vent $\in [0^\circ; 360^\circ]$ et v sa vitesse en $m.s^{-1}$.

Pour la convection interne la corrélation d'ARNOLD est utilisée [CHAPMAN, 1974]. La relation proposée pour une inclinaison ϕ de la paroi sur $90^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ est la suivante :

$$N_u = 1 + [N_{u,90} - 1] \sin \phi \quad (\text{F.7})$$

où $\phi = 90^\circ$ est le plan vertical et $\phi = 180^\circ$ le plan horizontal face vers le bas. Le nombre de NUSSELT évalué pour $\phi = 90^\circ$ ($N_{u,90}$) est défini par :

$$N_{u,90} = \max\{N_{u,1}, N_{u,2}, N_{u,3}\} \quad N_{u,1} = 0,0605 (R_{a,L})^{\frac{1}{3}}$$

$$N_{u,2} = \left[1 + \left[\frac{0,104 (R_{a,L})^{0,293}}{1 + (6310/R_{a,L})^{1,36}} \right]^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad N_{u,3} = 0,242 \left(\frac{R_{a,L}}{A} \right)^{0,272}$$

Cette corrélation est valable pour les conditions suivantes : $5 < A < 110$ et $10^2 < R_{a,L} < 2 \cdot 10^7$. Avec $R_{a,L}$ le nombre de RAYLEIGH évalué pour la hauteur L et A le rapport d'allongement (H/L).

1.2 Sur le substrat

Traditionnellement, les modèles de PCV définissent le coefficient de convection selon une autre approche, basée sur la résistance au transfert elle est énoncée par l'équation F.8. Cette formulation à l'avantage de permettre de considérer aisément les différents phénomènes limitant ce dernier. En effet, par analogie thermo-électrique la résistance totale est la somme des résistances en séries observées. Il s'agit en général de la résistance aérodynamique thermique (r_a^t) qui est fonction de l'état de surface (rugosité, *etc.*) et d'une résistance associée au transfert hygrique à l'interface substrat/air extérieur (r_{ss}^t).

En surface du substrat, lorsque celui-ci est organique, r_{ss}^t est également fonction de l'état de surface, lui-même dirigé par la teneur en eau. Son expression est présentée par l'équation F.9, avec $\{\xi_i\}$ des paramètres constants [TABARES-VELASCO et SREBRIC, 2012].

$$h_{cv}^t = \frac{\rho_{air} c_{p,air}}{r_a^t + r_{ss}^t} \quad (F.8)$$

$$r_{ss}^t = \xi_1 + \xi_2 \left(\frac{\omega_s}{\omega_{sat}} \right)^{\xi_3} \quad (F.9)$$

1.3 Sur la canopée

À l'instar de la formulation en surface du substrat, la formulation du coefficient de convection en surface de la canopée est basée sur la résistance au transfert (eq. F.10).

$$h_{cv}^t = 2 \text{ LAI} \frac{\rho_{air} c_{p,air}}{r_a^t} \quad (F.10)$$

1.4 Dans la canopée

Selon le type de PCV, et particulièrement la densité de la végétation (limitant le transfert aéraulique), il est possible qu'il soit nécessaire de prendre en compte¹ les transferts convectifs au sein de la canopée. L'approche utilisée considère deux modes d'échanges : feuille/air et air/air ; tous deux pouvant être de type libre ou forcé (fig. F.1).

Les densités de flux thermique associées aux transferts convectifs feuille/air (φ_{cv}^α) et air/air (φ_{cv}^β) sont formulés de la manière suivante :

$$\varphi_{cv}^\alpha = 2 \text{ LAD}_{\Delta z} \rho_a c_{p,a} h_{cv,i}^{*,\alpha} \Delta z \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{fa} \quad (F.11)$$

$$\varphi_{cv}^\beta = \rho_a c_{p,a} h_{cv,i}^{*,\beta} \Delta z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (F.12)$$

1. C'est typiquement le cas de la PCV $_{L_{sa}}^{Th}$, alors que la PCV $_{ce}^{Th}$ est tellement dense que les transferts convectifs en son sein peuvent être négligés en première approche.

Où Δz correspond à la hauteur de la maille lors de la discrétisation. Par ailleurs, dans ce contexte, la largeur de celle-ci (Δx) correspond à la distance moyenne entre l'air et les feuilles. L'indice *fa* associé au gradient de température indique que celui-ci s'exprime entre les nœuds d'air et de feuille (même altitude). À noter que le couplage avec la température d'air extérieur se fait via le nœud en surface externe de la canopée (Cf. figure F.1).

Les paramètres $h_{cv,i}^{*,\alpha}$ et $h_{cv,i}^{*,\beta}$ sont les coefficients de convection cinématique du nœud *i* associés aux transferts aérauliques horizontaux et verticaux, respectivement. Selon le type de convection, ces coefficients peuvent être exprimés² par les relations F.13 et F.14. Où $\{A, B, C, D\}$ sont des paramètres constants et avec ΔT la différence de température entre les nœuds considérés.

$$h_{cv,i}^* = A + B \Delta T^C \quad \text{Convection libre} \quad (\text{F.13})$$

$$h_{cv,i}^* = A + B v^C \quad \text{Convection forcée} \quad (\text{F.14})$$

Selon PERRIER [1976], la vitesse du vent dans la canopée (*v*) peut être déduite de la vitesse au dessus de la canopée (*v*₀) via le modèle suivant : $v = v_0 e^{-D \text{LAD}(z)}$.

1.5 Sous la canopée

Sous la canopée, quelque que soit le type de surface, la formulation est similaire à celle associée à la surface du substrat. La différence réside dans le choix de la température d'air utilisée. En effet, la température d'air extérieur est délaissée au profit de la température d'air sous la canopée (T_f^{sc}). Cette approche³ est explicitée par l'équation F.15. À noter que le coefficient de convection cinématique ($h_{cv,i}^{*,\beta}$) s'exprime de la même façon que dans la canopée.

$$\varphi_{cv}^\beta = \frac{\rho_a c_{p,a}}{r_s^t + 1/h_{cv,i}^{*,\beta}} (T_f^{sc} - T_s) \quad (\text{F.15})$$

2 Rayonnement

2.1 Formalisme des sollicitations CLO

Sur terre, le rayonnement CLO est uniquement⁴ d'origine solaire. Prévisible, cette sollicitation est liée la course apparente du soleil dans le ciel. Caractérisée par la puissance du flux extraterrestre⁵, cette sollicitation suit des cycles circadiens, mais aussi annuels (entre autres); l'azimut et l'élévation solaire sont alors obtenus par des fonctions (trigonométriques) horaires. Ainsi, l'irradiation solaire sur une paroi est modélisable à partir de ses données géométriques

2. À noter que des relations de type adimensionnelles peuvent également être utilisées; en première approche ce n'est pas le cas ici, mais cette option sera considérée lors de l'étape de validation.

3. Une seconde approche est possible, mais celle-ci ne prend pas en considération l'impact de la transpiration sur la température locale : il s'agit de conserver le ΔT initial et, par propriété d'additivité, d'ajouter la résistance aérodynamique issue de la canopée aux résistances aérodynamiques liées à l'état de surface ainsi qu'à une éventuelle résistance au transfert hygrique (si substrat sous la canopée).

4. Les sources de rayonnement CLO d'origine humaines (illumination de voiries, *etc.*) ne sont pas considérées ici, car trop peu énergétiques.

5. La puissance surfacique du flux extraterrestre est en moyenne de 1367 W.m^{-2} au dessus de l'atmosphère (source : WMO 1982). Il est toutefois possible d'avoir localement une densité de flux supérieure à la valeur extraterrestre lors de conditions météorologiques particulières (la nébulosité créant un effet de cavité, concentrant le rayonnement) des valeurs atteignant 1500 W.m^{-2} ont été rapportées [KIPP&ZONEN, 2013].

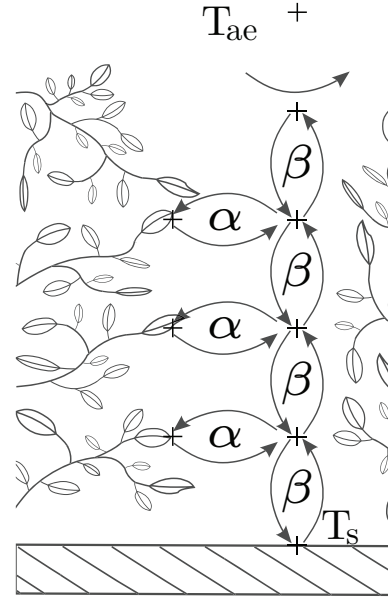


Figure F.1 – Conceptualisation des transferts convectifs dans la canopée.

(inclinaison et orientation de la paroi), de géopositions (latitude et longitude) et temporelles (jour julien et heure circadienne). L'algorithme de calcul associé aux sollicitations solaires est explicité par la figure F.2.

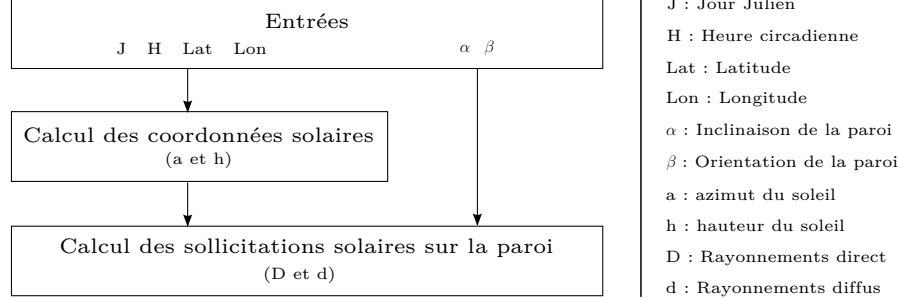


Figure F.2 – Algorithme du calcul des sollicitations solaires de type CLO sur une paroi d'orientation et d'inclinaison quelconques. Adapté de [MIRANVILLE, 2002]

À noter que l'irradiation solaire (φ_{CLO}) est l'un des paramètres les plus influents du champ thermique ; or, celui-ci est soumis à une forte variabilité due aux conditions météorologiques (présence de nuages). En ce sens, lorsque les données sont accessibles, l'utilisation de la mesure *in situ* est souvent privilégiée lors des simulations en physique du bâtiment.

2.2 Formalisme des sollicitations GLO externes

Les sollicitations GLO externes sont liées aux échanges radiatifs entre la paroi étudiée et, d'une part l'environnement, d'autre part la voûte céleste. Le modèle mathématique associé fait intervenir la température de l'environnement (T_{env}), la température de paroi (T_p) et la température⁶ la voûte céleste (T_{vc}). Les facteurs de formes associés aux surfaces de voûte céleste et d'environnement, observés depuis la surface de la paroi (respectivement les facteurs d'environnement et de voûte céleste), sont classiquement modélisés via l'inclinaison de la paroi (eq. F.16) ou bien via les valeurs⁷ des facteurs de ciel et d'environnement (eq. F.17). Dans ces équations ε_p correspond à l'émissivité de la paroi.

$$\varphi_{GLO,e} = \varepsilon_p \sigma \left[\frac{1 + \cos(\alpha)}{2} (T_{vc}^4 - T_p^4) + \frac{1 - \cos(\alpha)}{2} (T_{env}^4 - T_p^4) \right] \quad (F.16)$$

$$\varphi_{GLO,e} = \varepsilon_p \sigma \left[FF_{vc} (T_{vc}^4 - T_p^4) + FF_{env} (T_{env}^4 - T_p^4) \right] \quad (F.17)$$

À noter que T_{env} est couramment assimilée à la température de l'air extérieure T_{ae} , alors que T_{vc} est lui souvent modélisé par $T_{vc} = T_{ae} - k$, avec k une constante dépendant du lieu d'étude [MARA, 2000]. Enfin, cette expression est linéarisée (eq. F.18) et adaptée à une température exprimée en Celsius (Kelvin précédemment).

$$\varphi_{GLO,e} = H_{vc} (T_{vc} - T_p) + H_{env} (T_{env} - T_p) \quad (F.18)$$

6. T_{vc} correspond à la température apparente de la voûte céleste observée depuis la surface de la paroi.

7. Acquisition de ces facteurs développée en annexe 1.

Avec⁸

$$H_{vc} = \varepsilon_p \sigma F F_{vc} \left(T_{vc}^2 - T_p^2 \right) \left(T_{vc} - T_p \right) \approx 4 \varepsilon_p \sigma F F_{vc} \left(273,15 + \frac{T_{vc} + T_p}{2} \right)^3 \quad (\text{F.19})$$

$$H_{env} = \varepsilon_p \sigma F F_{env} \left(T_{env}^2 - T_p^2 \right) \left(T_{env} - T_p \right) \approx 4 \varepsilon_p \sigma F F_{env} \left(273,15 + \frac{T_{env} + T_p}{2} \right)^3 \quad (\text{F.20})$$

2.3 Formalisme des sollicitations GLO internes

Les sollicitations GLO internes sont issues des échanges énergétiques entre les parois de l'enveloppe du bâtiment se faisant face. Selon la littérature, de nombreuses approches [BIGOT, 2011] existent pour modéliser ces transferts :

- Méthode des radiosités ;
- Méthode des ordonnées discrètes ;
- Méthode de Monte-Carlo ;
- Méthode de tracé de Rayon ;
- Méthode d'approximation dans les milieux mono-dimensionnels, *etc.*

Dans notre cadre d'étude, les méthodes simplifiées et/ou la méthode des radiosités sont utilisées. Elles sont par ailleurs déjà implémentées dans ISOLAB [MIRANVILLE, 2002].

2.3.1 La méthode des radiosités

La méthode des radiosités consiste à établir de manière exacte un bilan des flux entre les n parois d'une enceinte. La notion de radiosité (J) associée à une surface désigne ici la densité de flux radiatif quittant cette surface par émission et réflexion. Les hypothèses simplificatrices associées sont :

- Les surfaces sont des corps gris, opaques et lambertien ;
- les densités de flux et les températures de surface sont uniformes ;
- Le fluide au sein de l'enceinte (l'air) est parfaitement transparent.

Si une enceinte est composée de n parois, alors la radiosité J_p associée à la paroi p est exprimée par l'équation F.21, où ε_p est l'émissivité GLO de la paroi p , M_p son émittance GLO [W.m^{-2}], ρ_p sa réflectivité GLO et FF_{pj} le facteur de forme entre les parois p et j (observé depuis p).

$$J_p = \varepsilon_p M_p^0 + \rho_p \sum_{j=1}^n FF_{pj} J_j = \varepsilon_p M_p^0 + (1 - \varepsilon_p) \sum_{j=1}^n FF_{pj} J_j \quad (\text{F.21})$$

En appliquant l'expression F.21 à l'ensemble des surfaces, on aboutit au système d'équations F.22, où δ_{pj} est le symbole de KRONECKER et T_p température de surface intérieure de la paroi p .

$$\sum_{j=1}^n \left[\delta_{pj} - (1 - \varepsilon_p) FF_{pj} \right] J_j = \varepsilon_p \sigma T_p^4 \quad (\text{F.22})$$

Ainsi, la densité de flux nets (flux émis – flux absorbé) pour la paroi p s'écrit :

$$\varphi_{GLO,p}^{net} = \frac{\varepsilon_p}{1 - \varepsilon_p} \left(\sigma T_p^4 - J_p \right) \quad (\text{F.23})$$

$$= \sum_{j=1}^n \left[\delta_{pj} - FF_{pj} \right] J_j \quad (\text{F.24})$$

8. H_{vc} et H_{env} variant très peu dans la plage de température caractéristique des climats tempérés, CACCAVELLI [1988] propose $H_{vc} = 4,7 \text{ m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ et $H_{env} = 5,7 \text{ m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

En fonction de la grandeur souhaitée, les équations précédentes aboutissent à deux systèmes en radiosités, basés sur les températures de surface ou bien sur les flux émis.

1. Cas où les flux sont souhaités

Les radiosités sont alors calculées à partir des températures de surfaces, via les émittances. Le système à résoudre est défini par l'équation F.25. Les flux nets sont alors obtenus par l'équation F.23.

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - (1 - \varepsilon_1)FF_{11} & -(1 - \varepsilon_2)FF_{12} & \cdots & -(1 - \varepsilon_n)FF_{1n} \\ -(1 - \varepsilon_1)FF_{21} & 1 - (1 - \varepsilon_2)FF_{22} & \cdots & -(1 - \varepsilon_n)FF_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -(1 - \varepsilon_1)FF_{n1} & -(1 - \varepsilon_2)FF_{n2} & \cdots & 1 - (1 - \varepsilon_n)FF_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 M_1^0 \\ \varepsilon_2 M_2^0 \\ \vdots \\ \varepsilon_n M_n^0 \end{bmatrix} \quad (\text{F.25})$$

2. Cas où les températures sont souhaitées

Les radiosités sont alors calculées à partir des flux de surfaces. Le système à résoudre est défini par l'équation F.26. Les températures sont alors obtenues par F.27 issue de la reformulation de l'équation F.23.

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - FF_{11})S_1 & -FF_{12}S_2 & \cdots & -FF_{1n}S_n \\ -FF_{21}S_1 & (1 - FF_{22})S_2 & \cdots & -FF_{2n}S_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -FF_{n1}S_1 & -FF_{n2}S_2 & \cdots & (1 - FF_{nn})S_n \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \varphi_{GLO,1}^{net} \\ S_2 \varphi_{GLO,2}^{net} \\ \vdots \\ S_n \varphi_{GLO,n}^{net} \end{bmatrix} \quad (\text{F.26})$$

$$T_p = \sqrt[4]{\frac{S_p}{\sigma} \cdot \left[\frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p} \varphi_{GLO,p}^{net} + J_p \right]} \quad (\text{F.27})$$

Ce formalisme permet d'établir l'expression de la température radiante moyenne T_{rm} (eq. F.28), pour laquelle les FF_{ci} sont des facteurs de formes qui peuvent être évalués de manière simplifiée par l'équation F.29 [ALLARD et al., 1986].

$$T_{rm} = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^n J_i FF_{ci}}{\sigma}} \quad (\text{F.28})$$

$$FF_{ci} = \frac{S_i}{\sum_{j=1}^n S_j} \quad (\text{F.29})$$

2.3.2 La méthode simplifiée

Avec un temps de calcul plus faible, la méthode simplifiée consiste à évaluer approximativement les sollicitations GLO internes d'une paroi par une formulation similaire à l'équation de NEWTON, pour laquelle la température d'air est remplacée par la température radiante moyenne (eq. F.30). L'expression de T_{rm} est définie par l'équation F.31. Selon ALLARD et al. [1986], le recours à cette méthode entraîne sur T_{rm} une erreur de quelques dixièmes de degrés par rapport à la méthode des radiosités. À noter que cette méthode n'est valable que si les parois sont considérées comme des corps noirs.

$$\varphi_{GLO,p}^{net} = h_{rd,p}(T_{rm} - T_p) \quad (\text{F.30})$$

$$T_{rm} = \frac{\sum_{p=1}^n S_p T_p}{\sum_{p=1}^n S_p} = \frac{\sum_{p=1}^n S_p T_p}{S_{tot}} \quad (\text{F.31})$$

3 Condensation

La condensation est liée à la température de rosée (eq. F.32), mais également aux pressions partielles en vapeur d'eau actuelle (eq. F.33) et à saturation (eq. F.34). Celles-ci sont présentées ci-dessous.

$$T_{ros}(z, t) = \frac{3928,5}{23,3696 - \log[P_v(z, t)]} - 231,667 \quad (\text{F.32})$$

$$P_v(z, t) = \frac{W(z, t) P(z, t)}{W(z, t) + 0.622} \quad (\text{F.33})$$

$$P_v^{sat}(z, t) = 611,21 \exp \left[\frac{18,729 - T(z, t)/227,3}{1 - 257,87/T(z, t)} \right] \quad (\text{F.34})$$

Où T_{ros} est en $^{\circ}\text{C}$ et la pression en $[\text{Pa}]$.

Section G

Création de PcvBât

1 Génèse

1.1 Contexte et besoins

Dans le cadre de cette thèse, d'un point de vue numérique, l'objectif est de pouvoir simuler le comportement thermique d'une PCV via un modèle de type semi-détaillé. Pour ce faire, le code de calcul sera couplé à ISOLAB, permettant ainsi la modélisation d'un bâtiment complet ainsi que l'usage des outils déjà développés (prédiction du confort, analyse de sensibilité, couplage avec GENOPT).

De plus, comme explicité section II du chapitre 1, il s'avère que les PCV peuvent revêtir diverses formes et compositions. Il est donc nécessaire de créer un module permettant la description de cette diversité.

Enfin, aux vues des nombreux modèles implémentés, une approche permettant de définir ceux usités ainsi que l'ordre de leurs appels est nécessaire afin de s'assurer de la cohérence entre les sous-modèles choisis et le modèle composé.

1.2 Approche

— Description globale —

Afin de modéliser une PCV un code multi-modèle est créé : PcvBât. Générique et modulaire, il doit permettre de modéliser toutes les PCV imaginables. Pour ce faire, chacune des couches est décrite spécifiquement par ses caractéristiques physiques. Le choix explicite de chacun des modèles utilisés, pour chacun des phénomènes physiques de chacune des couches, en fait un code multi-modèle. La modularité en permet par ailleurs l'évolution, via l'ajout de nouveaux modèles, si nécessaire (pour un phénomène physique donné).

À noter que le code de calcul créé PcvBât, intégré à ISOLAB, est un module autonome faisant partie d'un code de calcul plus vaste dédié aux PCV.

— L'environnement de programmation —

L'implémentation d'un code de calcul se fait en fonction du langage de programmation. Dans le cas de PcvBât, les critères de ce choix portaient sur la souplesse du langage (codage rapide), ainsi que sur la reconnaissance et l'intensité de son utilisation par la communauté scientifique. L'environnement de programmation quant à lui devait permettre une visualisation des données obtenues ainsi qu'une capacité de contrôle des erreurs inhérentes à la programmation (« débogage »). Divers langages et environnements répondaient à ces critères. Dans le but de permettre

une intégration rapide de PCVBÂT à ISOLAB, facilitant le couplage, le choix s'est alors porté sur le langage MATLAB sous l'environnement du même nom. Outil puissant, MATLAB (*Matrix Laboratory*) est développé pour le calcul matriciel. Le langage de programmation associé est de haut niveau (langage interprété). Il présente de nombreux avantages en termes de syntaxe, gestion des variables et de fichiers. De plus, la présence d'outils de développement ainsi que de nombreuses boîtes à outils annexes suffisent généralement pour l'implémentation et l'optimisation d'algorithmes numériques. Enfin, le choix de l'utilisation d'un langage interprété a par ailleurs permis de coder PCVBÂT selon une approche nouvelle, complémentaire, au sein de l'équipe d'accueil : la génération de fichiers de modèle.

— *Le couplage à ISOLAB* —

Concernant le couplage, l'appel du générateur de modèle « PCVBÂT » à ISOLAB, se fait via l'interface de ce dernier. Il permet ainsi la définition de la PCV souhaitée. Puis, une fonction est générée automatiquement lors de la création du modèle ; elle permet l'appel spécifique du multi-modèle souhaité. Interprété à chaque pas de temps, le modèle génère et stocke dans une structure les tenseurs nécessaires. Ils sont alors récupérés par ISOLAB et couplés aux systèmes d'états thermique, hydrique et hygrique en vue de la résolution.

— *Générateur de modèle* —

PCVBÂT permet de générer les fichiers de modèles nécessaires à la simulation. Cette approche consiste à générer en amont de la simulation un fichier contenant exactement le modèle adapté à la modélisation souhaitée. Ainsi, seul le code nécessaire est interprété, limitant les instructions conditionnelles et augmentant par conséquent la vitesse d'exécution. La création est basée sur l'analyse des choix de l'utilisateur lors de la description de la paroi et des phénomènes modélisés. La création d'un « fichier de modèle » possède entre autres les avantages suivants :

1. Le code réellement exécuté est alors aisément vérifié : pas de risque d'erreur dans les boucles conditionnelles ;
2. Le « débogage » est simplifié : code bien plus synthétique (digeste) et accès direct à l'environnement incriminé via la console (connaissance de l'état exact du système au moment du bogue) ;
3. Le fichier texte permet d'augmenter la capacité d'intervention dans le code, lors de tests, modifications, *etc.* ;
- 4 La génération automatique du fichier permet de limiter¹ les erreurs issues des développements temporaires issus du test du modèle ;
- 5 Il est possible de sauvegarder le modèle utilisé (pour archivage ou vérification ultérieure, *etc.*) ;
- 6 Il facilite l'extraction du modèle en vue de l'intégrer à un outil d'aide à la décision dans une version simplifiée de PCVBÂT.

2 Structure et algorithmes

2.1 Choix structurels

L'environnement MATLAB possède de nombreux avantages pour l'implémentation des modèles (interface ergonomique, outils de « débogage », fonctions de base déjà implémentées, *etc.*), toutefois comme tout langage interprété il possède une caractéristique possiblement limitante importante : son temps² d'exécution. Considérant cet aspect, dans le but de définir l'approche structurelle du programme (modèle) une étude sur la célérité des méthodes accessibles est effectuée. L'objectif est d'obtenir un temps de simulation minimal.

1. La génération automatique permet de créer le modèle souhaité "vierge" de toute modification.

2. Bien que l'augmentation des capacités des processeurs, des mémoires vives ou d'accès au stockage (disques durs SSD) tendent à diminuer ce temps d'exécution, les modèles de plus en plus complexes compensent cette évolution.

À noter que tous les calculs présentés dans cette section ont été effectués sous l'environnement MATLAB 7.9.0 (R2009b), où le temps est acquis à l'aide de la commande `cputime`, il s'agit donc de temps « processeur ». Enfin, l'ordinateur utilisé possède un processeur SEMPRON 3200+, avec 2 Go de RAM.

2.1.1 Création du système

Durant la simulation, le système matriciel est recréé (au moins partiellement) à chaque itération. Cette action induit un temps de calcul qui dépend de la structure du modèle utilisé. Le langage MATLAB étant un langage interprété, nous utilisons cette notion à travers deux des trois approches suivantes :

- Test des instructions conditionnelles à chaque itération (cas classique) ;
- Test des instructions conditionnelles durant la première itération et enregistrement dans une chaîne de caractère des instructions nécessaires (uniquement). Évaluation de cette chaîne durant les itérations suivantes ;
- Interprétation d'un fichier de script contenant les instructions nécessaires (identique au contenu de la chaîne de caractère précédente).

Chacune de ces approches possède ses avantages et inconvénients, notre critère ici est le temps de calcul. Dans le but de définir la structure la plus adaptée à nos besoins, un test a été opéré : il s'agit de résoudre 400 fois la commande `b=b*5` présente (1) directement dans le script interprété, (2) évaluée depuis ce script ou (3) appelée, car positionnée dans un autre script. Ces trois modes représentent les trois approches présentées précédemment, les résultats sont présentés par la table G.1b. Il apparaît que l'évaluation directe n'est pas adaptée à nos besoins, par contre l'appel d'un script tierce peut-être adéquat si celui-ci est dans un fichier '.m', permettant ainsi un appel direct. Le choix est alors fait en fonction du temps occupé par les instructions conditionnelles.

2.1.2 Interprétation des conditions

L'interprétation des conditions nécessite du temps de calcul, mais combien ? Afin de répondre à cette question, et ainsi pouvoir définir la structure de modèle utilisée, les conditions sont évaluées (tab. G.1c et G.1d). Il apparaît que les tests³ numériques sont bien plus rapides et que les instructions conditionnelles imbriquées permettent un léger gain de temps.

Ces données permettent de conclure que l'usage des instructions conditionnelles est adéquat si le temps associé est inférieur à $6 \cdot 10^{-5}$ s, ce qui correspond à 25 tests numériques de type `if ... else ... end`. Au-delà de ce quota, l'usage du script est alors préférable.

2.1.3 Création du fichier

La création du fichier se fait en quatre étapes :

1. Création de la chaîne contenant les instructions nécessaires : `Chaine(end+[1:x])=Ajout ;`
2. Création du fichier de script : `fid=fopen(fichier) ;`
3. Écriture de la chaîne dans le fichier : `fprintf(fid,Chaine) ;`
4. Fermeture du fichier : `fclose(fid)`.

Les étapes 2 et 4 sont très brèves ($\sim 8,5 \cdot 10^{-5}$ s). L'étape 3 est également assez rapide, elle dépend de la taille de la chaîne de caractère : $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ s pour 5000 caractères, contre $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ s pour 10^6 caractères (qui produit un fichier de $\sim 9,5$ Mo).

Enfin, le plus long est la création de la chaîne de caractère, car dépendant des instructions conditionnelles. À noter que celle-ci étant effectuée avant la simulation, ce délai n'est pas pris en considération dans nos critères. Toutefois, afin d'en limiter le temps d'exécution deux approches

3. Les valeurs indiquées sont la moyenne de 10 tests possédant chacun 1000 itérations.

ont été étudiées : via concaténation ou bien via ajout direct (tab. G.1e). Considérant les résultats⁴, l'approche directe est choisie ; elle induit la création du fichier de script en 0,8 seconde dans les conditions explicitées.

2.1.4 Autres solutions

D'autres solutions existent pour améliorer la célérité de la simulation, en voici les principales :

- L'utilisation de `pcode` où « pseudo-code » (avatar de fonction compilé) permet de gagner en temps, mais induit l'impossibilité d'accès au code. Dans une optique de développement le `pcode` n'est pas utilisé.
- L'utilisation du `C` dans `MATLAB` est possible (moyennant quelques modifications). Bien qu'intéressante, cette perspective n'est pas usitée, car induit un temps de développement trop long. Il peut-être intéressant par ailleurs, localement, pour une fonction induisant un temps de simulation important. Dans notre cas le `C` n'est pas utilisé.
- La parallélisation peut également être intéressante, mais dans notre cas celle-ci s'applique en général à la résolution du système, hors ceci est fait par `ISOLAB` et non `PCVBÂT`. Toutefois, tout comme le `C`, l'utilisation locale peu être utile. Dans notre cas la parallélisation n'est pas utilisée.
- Enfin, le stockage des matrices induit un temps de calcul possiblement important si celles-ci sont de grande dimension. Afin de limiter le temps de calcul, des algorithmes ont été inventés pour adapter l'algèbre matricielle aux matrices dites « *sparse* ». Il s'agit de matrice stockant uniquement les valeurs non nulles, ce qui est le cas en physique du bâtiment puisque celles-ci sont généralement tridiagonales (hors termes de couplage). Bien qu'`ISOLAB` n'utilise pas les matrices *sparse* actuellement, son utilisation pourrait être développée dans un avenir proche. De ce fait, cette approche est usitée au sein de `PCVBÂT`.

2.2 Organisations

Considérant les vitesses d'exécutions, et tous les avantages cités précédemment, le modèle interprété est stocké dans un jeu de fichier propre. La structure de ce dernier, sa création, et son utilisation (appel par `ISOLAB`) sont explicités dans les paragraphes suivants.

2.2.1 Définition des fichiers nécessaires

— *Fichiers d'initialisation et itération* —

Durant la simulation, le modèle souhaité est interprété à minima une fois à chaque pas de temps. Or certaines grandeurs calculées restent constantes durant la simulation. Afin de limiter le temps de calcul, seules les grandeurs variables sont calculées ; *i.e.* : les autres calculs sont dissociés et stockés dans un fichier séparé afin d'être interprété uniquement lors du premier appel au modèle. L'appel de ce fichier est la phase d'initialisation du modèle. Les fichiers d'initialisation et d'itération sont respectivement nommés⁵ `Modele_PCV_Ini.m` et `Modele_PCV_It.m`.

— *Fichiers d'évaluation* —

Dans le cas d'un bâti possédant plusieurs PCV l'approche choisie consistant à appeler un script n'est plus valide, car le nom du fichier doit être fixe et unique (ce qui n'est pas le cas si il existe plusieurs PCV). Afin de pallier cet écueil, un fichier d'appel est généré automatiquement.

4. Les valeurs indiquées correspondent à la moyenne de 10 tests ajoutant 1000 fois la chaîne `Ajout` (1000 caractères) à `Chaîne`.

5. Où « `Modele_PCV` » est un exemple.

Table G.1 – Temps associés aux diverses étapes et méthodes étudiées.

(a) Temps associés aux différentes approches d'appels des instructions.

Approche	Directe	Évaluation
Commande	/	eval(Chaine)
Temps [s]	$0,28 \cdot 10^{-3}$	$10,47 \cdot 10^{-3}$

(b) Temps associés aux différentes approches d'appels des instructions (suite).

Approche	Script			
Commande	run(Fichier)	run(./Fichier)	eval(Fichier)	Fichier.m
Temps [s]	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$15,10 \cdot 10^{-3}$	$0,55 \cdot 10^{-3}$	$0,34 \cdot 10^{-3}$

(c) Temps associé aux tests numériques et cursifs.

Type	Numérique	Chaîne de caractères
Commande	(A==1)	strcmp(B,'Test')
Temps [s]	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$

(d) Temps associé aux types de conditions.

Type	if ... end double	if ... else ... end
Temps [s]	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$

(e) Temps associé à la création de la chaîne de caractère selon l'approche choisie.

Approche	Concaténation	Directe
Commande	Chaine=strcat(Chaine,Ajout)	Chaine(end+[1:x])=Ajout
Temps* [s]	33,14	0,81

* x1000 itérations

Nommé `PcvBat_Evaluation.m` cette fonction peut être appelée par n'importe quel solveur en mesure de lui fournir les arguments nécessaires. Sa fonction il consiste ainsi à aiguiller l'exécution du programme vers le modèle associé à la PCV souhaitée. Il gère de plus l'appel aux fichiers d'initialisation et d'itération.

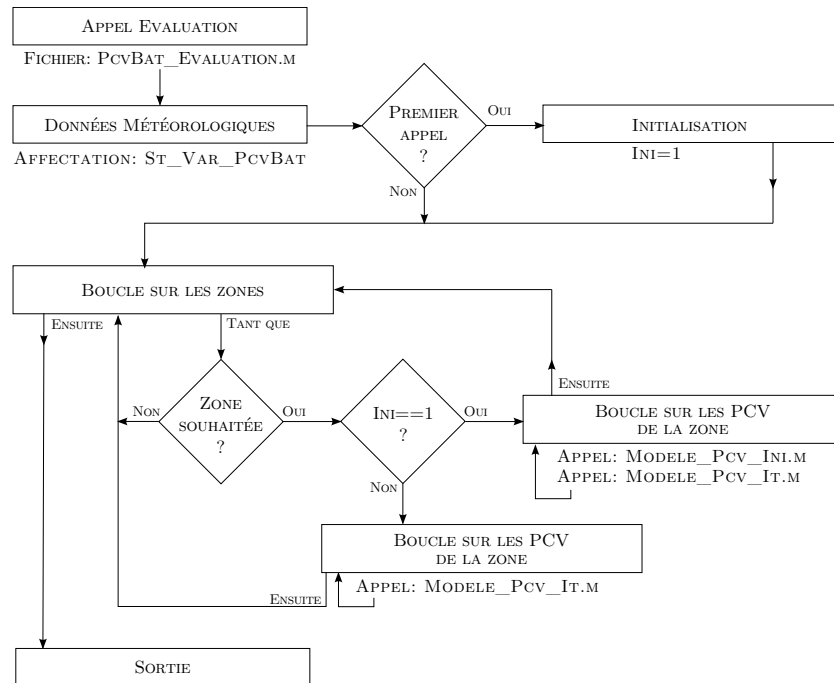


Figure G.1 – Algorithme associé au fichier d'appel générique des fichiers de modèles.

— Concaténation des modèles thermiques, hydriques et hygriques —

Le modèle ayant des composantes thermiques, hydriques et hygriques, il est nécessaire de l'organiser afin de permettre une interprétation différenciée selon le solveur d'appel (thermique, hydrique ou hygrique). Pour ce faire, une structure conditionnelle formate les fichiers de modèles (initialisation et itération). La variable de contrôle associée *thermique*, *hydrique* ou *hygrique* est alors simplement donnée en argument lors de l'appel du fichier d'évaluation (puisqu'appelé depuis le solveur considéré).

Ces fichiers de modèle (fonctions) sont créés par un générateur dédié. Celui-ci est décrit ci-après.

2.2.2 La création des fichiers de modèle

La création des fichiers de modèle est décrite via l'algorithme présenté par la figure G.3. Dans un premier temps sont définis la description du système étudié ainsi que sa modélisation et les phénomènes associés. Ensuite, un générateur au sein de PcvBÂT traite ces données. Pour cela il utilise les modèles définis dans sa base de données, gérant les dépendances à d'éventuels sous-modèles et les variables nécessaires. Ce code générique permet alors de définir les paramètres nécessaires, distinguant les paramètres constants (physiques ou mathématiques) et évolutifs. Au niveau de l'interface, cet aspect permet d'activer uniquement les paramètres physiques nécessaires et de dimensionner le nombre de cases et les étiquettes des paramètres mathématiques (Cf. interface). Enfin, une fois tous les paramètres acquis (une vérification est effectuée), les chaînes

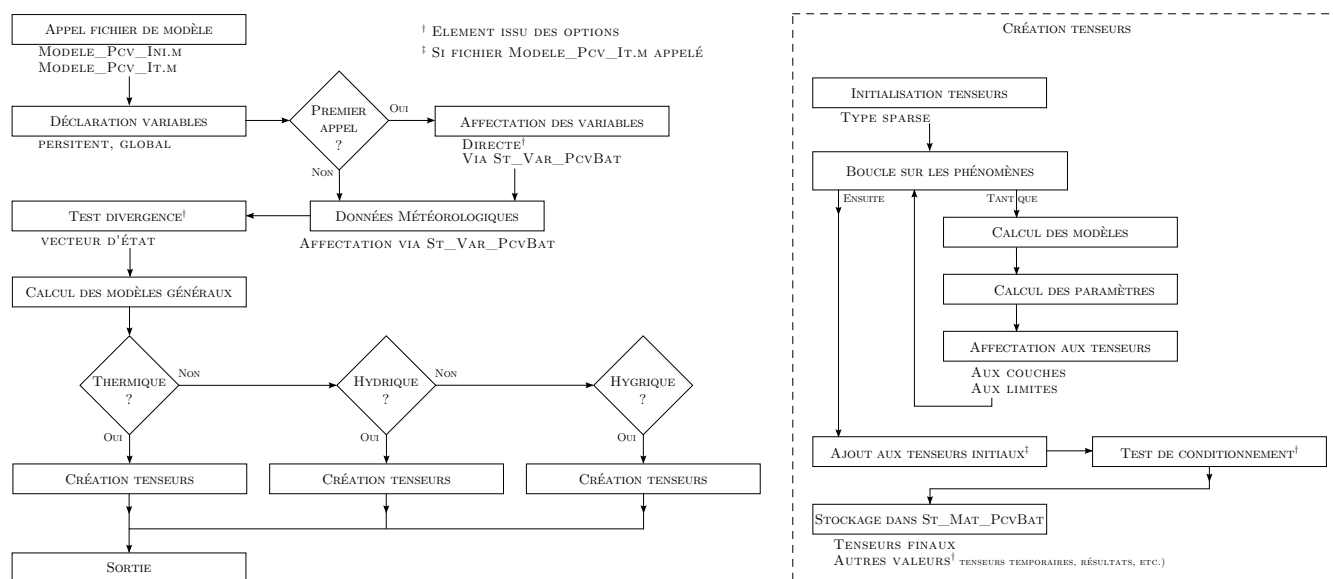


Figure G.2 – Algorithme d'exécution des fichiers de modèles.

sont organisées afin de gérer les dépendances⁶ et les organiser afin de permettre une interprétation différenciée selon le solveur (thermique, hydrique ou hygrique). Les fichiers peuvent alors être écrits. Ainsi, deux fichiers sont créés, l'un pour l'initialisation, interprété uniquement lors du premier appel (*Modele_PCV_Ini.m*) et le second interprété à chaque itération (*Modele_PCV_It.m*).

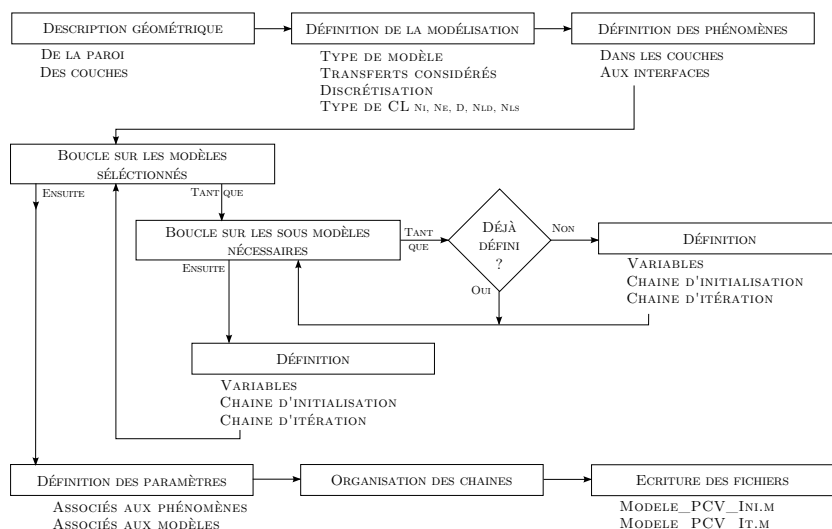


Figure G.3 – Algorithme de création des fichiers de modèles.

2.2.3 Fonctionnement interne de PcvBât

Module autonome, PcvBât possède une gestion propre de ses données. Celles-ci ainsi que ses actions avant et durant la simulation sont présentées dans les paragraphes suivants. À noter que toutes les actions effectuées, erreurs, choix de l'utilisateur, *etc.* sont consignées dans un journal en temps réel (utile pour le suivi lorsque PcvBât est lancé en mode silencieux ou pour

6. Un même modèle étant écrit une unique fois dans le fichier.

la sauvegarde des informations inhérentes à une simulation).

— Structures de données —

Les structures de données permettent de stocker sous une forme hiérarchisée les informations traitées par PCVBÂT. Elles sont au nombre de trois :

St_Var_PcvBat Permet le stockage des données inhérentes à la géométrie de la paroi, à la composition de ses couches, à leurs modélisations, aux variables associées ainsi qu'aux vérifications souhaitées durant la simulation. Celles-ci sont soit entrées par l'utilisateur via l'interface graphique, ou bien déduites par PCVBÂT (variables inhérentes au couplage, à la résolution, *etc.*).

St_Mat_PcvBat Permet le stockage des données préparées durant l'initialisation (matrices, *etc.*), et les versions finales actualisées à chaque pas de temps (nécessaire pour le couplage). Elle permet également le stockage de données temporaires et des résultats (vecteurs d'états, de sollicitations, *etc.*) pour une étude post-simulation de l'évolution du système (activation via interface graphique, *Cf.* figure G.4a).

St_Chaine_PcvBat Permet le stockage des diverses chaînes de caractères utilisées pour la création du modèle, distinguant les chaînes d'initialisation et d'itération. Elles sont réparties en quatre catégories : **Introduction**, **Couches**, **Ajout_Couche** et **Finalisation**.

Nota : Ces variables structurelles sont de type `global` afin d'être accessible par les fonctions d'appel si besoin (dans le cas présent depuis ISOLAB).

— Lors de l'appel avant la simulation —

Dans le but de permettre la simulation des PCV étudiées diverses actions sont effectuées par PCVBÂT en amont de l'appel aux modèles. Dans un fonctionnement couplé à un autre logiciel (ici ISOLAB) celles-ci se résument principalement à trois actions :

1. La création des structures (notamment **St_Var_PcvBat**) suite au chargement du fichier contenant la description du système ;
2. La vérification de la présence des fichiers de modèle (dénomination spécifique) et leurs générations le cas échéant ;
3. La création du fichier d'évaluation nécessaire pour la configuration actuelle.

— Lors de l'appel durant la simulation —

L'appel durant la simulation est géré par le fichier d'évaluation. Celui-ci permet de traiter consécutivement la génération des tenseurs de chacune des PCV présent dans une zone⁷ Ceux-ci sont par la suite récupérés lors du couplage avec le programme d'appel.

— La notion d'option associée au modèle —

L'un des avantages de la génération des fichiers de modèle est la capacité d'amender le code par des options. En effet, en fonction des besoins, des options peuvent être activées via l'interface graphique (*Cf.* figure G.4a). Celles-ci sont alors gérées et intégrées lors de la création du fichier.

Par exemple, lors du développement d'un modèle il est souvent nécessaire d'accéder à la mémoire en cours d'exécution au moment critique (divergence, arrêt brutal, *etc.*). Le modèle étant dans une fonction (pour l'approche développée ici ou en général), cet accès est alors impossible (hors gestion locale de l'erreur). À cette fin l'option « débogage » est créée. Elle est basée sur les commandes `try ... catch ... end` ainsi que `keyboard` (donnant l'accès direct à l'invite de commande) et combinée avec diverses fonctions d'aide au débogage développée spécifiquement.

7. Au sens d'une modélisation multizone : concept définissant généralement une pièce dans un bâtiment (*Cf.* section 1.2.1).

Par ailleurs, lors du premier appel du modèle, les paramètres nécessaires sont chargés dans la fonction. Ils sont de type **persistant** afin d'être appelé une unique fois. Défini via une option, leurs modes d'affectation est soit « direct » (la valeur numérique est indiquée dans le fichier) ou bien « indirect » (la valeur est présente dans la structure de donnée **St_Var_PcvBat**). La première ayant l'avantage de la célérité et du regroupement des données (si stockage du modèle envisagé) alors que la seconde possède l'avantage de la modularité (utile lors de l'analyse de sensibilité, *etc.*).

D'autres options ont été implémentées (spécifiquement pour le modèle créé) tel que le test du conditionnement des systèmes matriciels ou la divergence des vecteurs d'état.

3 Interfaçage

Considérant le volume des informations à communiquer au programme⁸ et la finalité actuelle (couplage à ISOLAB) celles-ci sont renseignées par l'utilisateur via une interface graphique. Source de nombreux développements⁹ est la face visible des travaux effectués, la figure G.4 en présente les principaux aspects.

L'interface permet en outre de définir chacune des couches composant la paroi, leurs positions (définition interactive), leurs compositions, dimensions et type (*i.e.* continu, poreux, liquide, gazeux ou végétal). Leurs modélisations sont spécifiques ; pour chacune d'elle est alors définie l'approche (simplifiée, semi-détaillée, et à terme réseau de neurones, *etc.*), les domaines concernés (thermique, hydrique, hygrique), la discrétisation et le type de conditions aux limites. Puis, pour chacun des domaines sélectionnés, vient la définition des phénomènes considérés et des modèles associés au sein des couches, ainsi qu'à leurs interfaces. Ces choix permettent alors d'indiquer la valeur des paramètres nécessaires ; pour les matériaux, une sélection est possible parmi ceux présents dans la bibliothèque pour le type de milieu considéré.

Par souci de compatibilité, l'interface est créée via l'outil de développement de fenêtre présent sous MATLAB. Afin d'être accessible et clair (surtout pour de petits écrans), le choix a été fait de rassembler tous les éléments inhérents à la modélisation d'une PCV sous une même fenêtre, induisant dès lors un affichage basé sur des onglets de navigation (source de développement particuliers).

Dans l'optique de permettre un usage aisé et intuitif de l'interface, l'ergonomie de la fenêtre a été étudiée. La gestion des champs a également été travaillée via la gestion : des dépendances, des (re-)initialisations¹⁰, des activations au fur et à mesure de leurs renseignements (entre autres). Selon la même démarche une fonction interceptant l'affectation des champs a été développée afin d'adapter les couleurs de fond et d'écriture des champs selon leurs statuts : *inactif*, *en attente* et *actif*. À titre d'exemple, la figure G.4c possède le champ « Hci Th » en attente. Cette modification thématique des couleurs a amené à créer un astucieux système¹¹ de thème, rendu compatible avec les fenêtres issues de versions précédentes de MATLAB grâce à une approche souple et générique. Ainsi lors du couplage, au-delà de l'ergonomie de PcvBÂT, il est possible d'adapter ce dernier afin qu'il soit en adéquation avec les couleurs du programme appelant (où

8. Note : dans un premier temps, la communication s'effectuait via un fichier d'option donné en argument à PcvBÂT. Un langage simple (de haut niveau) a été développé par le biais de mots clefs permettant de contrôler les options indiquées (et ne pas interpréter une commande malencontreuse...). Développée alors sous l'environnement OCTAVE (programme GNU multi-plateforme compatible avec le langage MATLAB) sur une plateforme DEBIAN, cette approche est conservée pour un usage sans accès à l'interface graphique (super calculateur, *etc.*).

9. Pour information, la gestion graphique au travers des divers fichiers (fonctions) associés représente un développement de plus de 15400 lignes (avec commentaires), soit environ autant que pour les modèles et leurs gestions (la création des fichiers).

10. Gestion faite dans la fenêtre aussi bien que dans la structure.

11. À noter que ce développement est codé de manière générique, via des fonctions dédiées, donc exportable pour n'importe quel système de fenêtre produite par MATLAB.

Figure G.4(a) shows two screenshots of the PcvBât software interface, specifically the 'Description' tab. The left screenshot displays the 'Géométrie' section, where users can define the geometry of the PCV (Paroi Complexe Végétalisée) by entering values for length, width, surface, perimeter, inclination, and orientation. The right screenshot displays the 'Conditionnement de [Me]' section, where users can select the type of conditioning (thermal or hydraulic) and define the precision of the results.

(a) Description géométrique et outils

Figure G.4(b) shows two screenshots of the PcvBât software interface, specifically the 'Modélisation' tab. The left screenshot displays the 'Choix de la couche' section, where users can select the layer type and material. The right screenshot displays the 'Modélisation' section, where users can select the approach and model type, and define the list of accessible thermal phenomena.

(b) Les modèles des couches et d'interfaces

Figure G.4(c) shows two screenshots of the PcvBât software interface, specifically the 'Variables' tab. The left screenshot displays the 'Choix de la couche' section, where users can select the layer type and material. The right screenshot displays the 'Variables modélisées' section, where users can select the variables to be modeled and define the material and model variables.

(c) Les variables associées aux matériaux et aux modèles

Figure G.4 – Aperçu des onglets principaux de l'interface de PcvBât.

de générer un thème spécifique indiquant le couplage, *etc.*).

Enfin, la hiérarchie de définition des informations nécessaires à la simulation est basée sur les couches présentes dans le système défini. Pour chacune d'entre elles, le choix des phénomènes considérés et leurs modèles associés permet de connaître les paramètres nécessaires à la simulation, qu'ils soient relatifs aux matériaux ou aux modèles. Comme pour le reste de l'interface, les champs sont interactifs (activation selon les choix de l'utilisateur). Toutefois, une spécificité apparaît pour les paramètres des modèles : ceux-ci n'étant pas prévisibles, le nombre, la position et l'intitulé des champs font l'objet d'un traitement spécifique, ils sont conditionnés par les modèles sélectionnés (fig. G.4c).

Section H

Apports à Isolab

Au cours des travaux de recherches, liés à la simulation des modèles implémentés, de nombreuses actions ont été menées au sein du logiciel ISOLAB, véritable plateforme expérimentale de simulation en physique du bâtiment. Il s'agit principalement du couplage thermique, hydrique et hygrique du module PcvBÂT, ainsi que la résolution des systèmes d'états associés. Mais au-delà de PcvBÂT, de multiples codes et modules génériques ont également été implémentés pour les besoins de la thèse. Citons par exemple les modules de transformation d'ISOLAB dédiés à la création d'exécutables (en mode GUI ou console), à l'archivage ou à la diffusion pour installation. Enfin, la philosophie d'ISOLAB étant la capitalisation modulaire, des développements inhérents à la maintenance et à la gestion des chemins (approche générique) ont été effectués en vue de faciliter l'entretien et le développement futur de cet excellent logiciel.

L'actuelle annexe présente ainsi le fichier de version d'ISOLAB sous sa forme brute, véritable livre de bord des diverses modifications effectuées.

```
# -----
#
# Fichier: version.txt
#
# Utilité: Fichier de version d'Isolab
#
# Note: Les mots clef "Version:", "Date:" et "-- Fin --" sont utilisés comme balise
#       par Isolab ne pas les modifier. Par contre, mettre à jour les valeurs des deux
#       premier. Le texte suivant "Date:" jusqu'à "-- Fin --" est utilisé par Isolab
#       sans pré-traitement. Suite au mot clef "-- Fin --", le texte n'est pas
#       affiché. Ceci permet de sélectionner les informations à communiquer dans
#       l'interface graphique (les plus anciennes étant souvent moins importantes).
#
# -----

# Données à éditer:
Version: V. 0.97
Date: 05 Septembre 2015
```

V0.97 - Édition du 03/09/2015 au 05/09/2015 - A.P. JEAN

- Ajout de la possibilité de post-traitement automatisé suite à la simulation d'Isolab (calcul des fonctions de coûts, etc.). Couplage effectif pour utilisation avec GenOpt (via la fenêtre d'appel et de gestion existante).
- Gestion graphique de la divergence des vecteurs d'états.

- Création d'un code permettant de définir la valeur optimale (vecteur temporel) d'un paramètre afin que le vecteur temporel d'une grandeur donnée (température, teneur en eau..) converge vers les valeurs souhaitées (utile pour les coefficients de convection, diffusion thermique, etc.).

V0.96 - Édition du 25/03/2015 au 29/04/2015 - A.P. JEAN

- Ajout dans la fenêtre accueil, d'un bouton permettant l'accès à une fenêtre rassemblant tous les exports inhérents à Isolab: création d'une archive pour diffusion ou sauvegarde en l'état, création d'une version exécutable en mode console (pour GenOpt), ou bien en mode GUI.
- Ajout de la compilation automatisée d'Isolab (mode graphique) pour utilisation sans Matlab. Adaptation des modifications des modifications depuis la version V0.90 effective. Nota: Les Macro-Modèles créés via PcvBât issus de la version exécutable d'Isolab ne sont pas utilisables par celle-ci actuellement.
- Ajout de la mémorisation du dernier thème utilisé (via fichier "Liste_Choix.Theme") et réutilisation lors de toute nouvelle ouverture d'Isolab.
- Ajout de la vérification de la divergence des vecteurs d'états (création de synthèse et accès clavier le cas échéant).
- Ajout de l'altitude dans la structure globale "site" et modification de la fenêtre accueil en conséquence.
- Résolution "couplage itératif zone et grandeur": ajout des options "analyse" et "accélération", permettant respectivement d'analyser la convergence (nombre de cycle) pour l'initialisation et d'accélérer la convergence de la solution si système oscillant autour d'une valeur constante, que la gaine soit "cylindrique" (amplitude constante: état multi-stable -> convergence solution unique impossible) ou bien "conique" (amplitude décroissante, linéaire ou non). Nota: convergence asymptotique non considérée.
- Résolution "couplage itératif zone et grandeur": modification de la considération de la température de rosée lorsque celle-ci se trouve bloquée dans un état "bi-stable" (dû au front de condensation, induisant une convergence impossible). Convergence atteinte via prise de moyenne des états stables.
- Accueil: Ajout d'une zone éditable pour la description succincte du fichier bâtiment chargé. Donnée stockée dans le fichier ".btm", idée issue de CodyRun.
- Analyse de sensibilité: ajout des options de simulation. I.e.: choix de l'affichage de la barre de progression des simulations (utile pour utilisation en arrière-plan) et choix des simulations partielles souhaitées (utile pour débogage/tests).
- Analyse de sensibilité: ajout chargement (et gestion) fichier ".sam" modifié afin de faciliter une analyse spécifique des paramètres souhaités.
- Analyse de sensibilité: ajout gestion ajout/suppression des labels pour l'assimilation de données et mémorisation de la position de la barre de progression tout au long des diverses simulations (permet de ne pas monopoliser l'écran).
- Ajout des PCV aux calculs de flux thermiques surfaciques. Note: calcul uniquement sur paroi solide, poreuse ou non (quelles que soient leurs positions).
- Analyse de sensibilité: débogage de l'interface, ajout générique des paramètres associés aux PCV.
- Optimisation paramétrique: généralisation de la création des fichiers nécessaires à l'appel de GenOpt. Automatisation de l'appel de GenOpt, avec choix du lancement en mode console ou graphique.
- Création de la fonction "Deploiement_Isolab" permettant de déployer (installer) une archive contenant une version d'Isolab supérieure à V0.90. Gère le path, la définition des chemins et l'appel à GenOpt.
- Création de la fonction "Obtenbtion_Dossier_Isolab" permettant de définir automatiquement le dossier d'Isolab à utiliser lors de l'ouverture de ce dernier. Permet ainsi l'installation de plusieurs versions d'Isolab sur une même machine (sans risque d'interférence).
- Création de la fonction "Archive_Isolab" permettant de créer une archive (propre) contenant Isolab et destinée à une installation ultérieure.
- Ajout de la compilation d'Isolab (mode console) pour utilisation via GenOpt si

besoin (automatique ou choix).

- Augmentation de la généricité du code gérant la création de la séquence d'optimisation.
- Ajout de la considération des PCV pour la création de la séquence d'optimisation. Optimisation effective.
- Ajout d'un mode de résolution: "couplage itératif zone et grandeur". Définit un couplage itératif sur chacun des vecteurs d'états observés simultanément.

V0.95 - Édition du 12/02/2015 au 19/03/2015 - A.P. JEAN

- Ajout du choix des sorties souhaitées pour l'hydrique.
- Couplage hydrique du module PcvBat (en plus du thermique)
- Modification de la sauvegarde de "zones" dans fichier ".btm". Les cellules peuvent maintenant contenir d'autres cellules (processus itératif), des chaînes et scalaires (vecteurs ou non) et être vides. Toutefois, la cellule contenant une structure n'est pas implémentée actuellement.

V0.94 - Édition du 23/11/2013 au 30/07/2014 - A.P. JEAN

- Gestion de la fermeture de la fenêtre de simulation (et des sous-fenêtres) même si une simulation est en cours.
- Création d'un système d'option pour Isolab, elles sont traitées via un fichier spécifique. Permet la définition des fichiers à charger (automatiquement) et des fenêtres à ouvrir. Structures option stockées dans un fichier via le principe utilisé pour structure "zones". Dossier d'option ajouté dans "Données".
- Ajout d'un bouton caché dans la fenêtre "accueil", accès par clic droit sur "relancer". Permet d'accéder à la création du fichier d'option (choix du nom demandé en console, options basées sur l'état d'Isolab à cet instant).
- Ajout d'une option à la fonction gest_print afin de rendre la création de la structure spécifique

V0.90 à V0.93 - Édition du 21/07/2013 au 25/08/2013 - A.P. JEAN

- Refonte de l'organisation du système de fichier au sein d'Isolab (chemins adaptatifs implémentés).
- Couplage thermique du module PcvBat
- Gestion de l'ouverture (création du path, des dossiers utiles, dossier de travail, etc.).
- Création de la fonction 'Creation_Structure' remplaçant les fonctions 'make_struct' et 'make_struct_gen' (plus générique).
- Trie alphabétique des noms dans les listes des menus déroulants.
- Création des thèmes pour Isolab (clic droit sur 'version').
- Modification saisie nom fichier '.btm' dans fenêtre description. Extension facultative, liste des fichiers accessible par clic droit sur zone.
- Mise à jour automatique des menus déroulants (fichiers bâtiments) entre les fenêtres 'simulation' et 'accueil'.
- Amélioration de l'activation/désactivation des objets lors du choix de la zone une fois celles-ci renseignées (entre autres).
- Test lors de l'ouverture de la description du bâtiment. Gestion des erreurs, transparent si incomplet ou corrompu.
- Création de la fonction 'Boite_Dialogue' permettant d'afficher une boîte de dialogue adaptable aux besoins et raccord avec le thème d'Isolab.
- Ajout de la capacité de supprimer les zones, vitrages, composants ou parois souhaités.
- Ajout de la possibilité de nettoyer le dossier d'Isolab automatiquement (clic droit sur "Fermer" dans la fenêtre d'accueil).
- Création de la fenêtre 'version' indiquant le présent texte, la date de modification et la version d'Isolab (refonte fichier version.txt).

-- FiN --

Section I

Communication sur les toitures végétalisées à La Réunion

Cette annexe a pour fonction la reproduction de la présentation faite au Forum des Jeunes Chercheurs 2011 de l'Université de La Réunion. Elle permet de contextualiser succinctement l'utilisation des PCV_H à La Réunion et de présenter les bénéfices attendus inhérents à leurs usages.

N.B. 1 : Cette publication a reçu le prix de la meilleure présentation dans sa catégorie.

N.B. 2 : L'article officiel et la présentation sont accessibles sur HAL [JEAN et MIRANVILLE, 2011].

Toitures végétalisées : Présentation du concept et bénéfices pour l'île de La Réunion

Laboratoire PIMENT, Pôle PhyBât, Université de La Réunion, 117 rue du général Ailleret, 97430 Le Tampon – France

Aurélien P. JEAN*, Frédéric MIRANVILLE

*aurelien.jean@univ-reunion.fr

Résumé

En matière de consommation énergétique mondiale, l'augmentation est indiscutablement la tendance actuelle. Conformément au contexte énergétique international, l'île de La Réunion doit faire face à une demande énergétique croissante. Après analyse de la répartition de ces besoins, la régulation thermique du bâti apparaît être l'un des postes les plus énergivores. Afin de réduire l'importance de ce poste, la solution présentement proposée consiste à végétaliser la structure afin d'en réduire la surchauffe.

Le présent article est une introduction vulgarisée au domaine des parois complexes végétalisées (PCV). Afin d'accréditer cette prétention, la notion de toiture végétalisée, leurs utilisations, ainsi que les différentes modifications qu'elles induisent y sont définies. L'illustration des propos est permise par l'application d'un cas d'étude concret, celui d'une utilisation sur l'île de La Réunion. Cette dernière permettant de définir divers impacts du système dans ces conditions.

Mots clés : Toiture végétalisée, PCV, Confort thermique, Gestion de l'eau, Effet d'îlot urbain, Biodiversité, Développement durable.

Abstract

The aim of this article is to present a vulgarized introduction to the vegetated complex partitions field, called VCP. To reach this goal, the green roof notions, their uses and implications are defined. The theory is illustrated by a Reunion Island case study, which allows to list several impacts of the green walls utilization.

Keywords : Green roof, VCP, Thermal comfort, Acoustic comfort, Water management, Heat island effect, Biodiversity, Sustainable development.

Introduction

Historique

Historiquement, la construction de PCV_H se fait de manière traditionnelle depuis plusieurs millénaires dans la zone paléarctique. On en retrouve les traces dans différents pays Scandinaves, ainsi qu'en Europe, en Mongolie et en Turquie. Le principe constructif développé au cours de ces millénaires fait toujours partie des traditions Amérindiennes d'Amérique du Nord. Celles-ci consistent en un épais mélange de terre et de végétaux herbacés enracinés créant un complexe isolant, étanche à l'air et à l'eau, résistantes au vent et au feu. Ces lourdes toitures exigent de solides charpentes et une couche protectrice (écorce de bouleau) placée entre le complexe végétalisé et la charpente afin que cette dernière ne subisse pas les méfaits de l'humidité. À l'heure actuelle, diverse PCV ont été développées afin de s'adapter aux besoins contemporains, toutefois le principe reste similaire.

L'intérêt scientifique et technique des PCV_H a débuté suite à la prise de conscience induite par le premier choc pétrolier (1973), depuis, de nombreuses expériences ont été conduites en Europe (Allemagne, Pays-Bas, Suisse et pays Scandinaves notamment). Plus récemment, et principalement pour des raisons d'ordre sanitaire, d'autres pays tels les États-Unis d'Amérique, le Canada et la Chine ont démontré un réel intérêt concernant les PCV_H.

Le contexte

Les différents événements de ces 40 dernières années, tels que les chocs pétroliers (1973, 1979, 2008) et les manifestations (Rio 1992, Kyoto 2002, *etc.*), ont permis une émergence¹ des PCV. Dans ce contexte, des études sur les PCV_H ont été mises en places par diverses équipes cherchant à les développer ou à les comprendre.

Outre ses capacités thermiques, les PCV ont été promues au niveau local par différentes villes pour diverses raisons. À Berlin, depuis 1980 des aides gouvernementales sont accordées pour le développement des PCV_H afin de soulager le réseau saturé des égouts, limitant ainsi les dépenses structurelles. En Suisse ou Autriche, la réglementation impose leurs utilisations sur les toitures adaptées. Concernant les grandes villes, les PCV_H permettent d'apporter une solution concernant les effets d'îlot urbain, de gestion des eaux de pluie et de pollution de l'air. Aux États-Unis d'Amérique, plusieurs grandes villes comme Chicago ou New York ont mis en place des systèmes d'incitations fiscales ou de subvention. Au Japon, la ville de Tokyo exige que toute construction occupant plus de 78 m² de terrain soit couverte de végétaux sur 20% de sa surface.

Quant à la France, il aura fallu attendre les années 2000 pour que l'utilisation des PCV s'amorcent à travers des réglementations et des incitations à la recherche. Par exemple, des villes (Paris, Grenoble, *etc.*) les prévoient dans leurs Plan Local d'Urbanisme [1].

Présentation des PCV_H

Définition

La Paroi Complexe Végétalisée (PCV), définit une paroi intégrant une couche végétale (vivante) quelque soit sa position, c'est typiquement le cas des toitures végétalisées (PCV_H). Celle-ci peut être présente pour des raisons écologiques, sanitaires ou tout simplement esthétiques. Considérant les phénomènes physiques mis en jeu, il est utile de définir deux types de PCV ; le critère retenu est l'inclinaison. Celle-ci est définie en degrés par rapport au plan l'horizontal, selon qu'elle soit comprise dans l'intervalle [0;35]° ou [36;90]° elle est arbitrairement considérée horizontale (PCV_H *i.e.* toiture) ou verticale (PCV_V *i.e.* mur).

Selon le contexte, l'étude ou le langage, une PCV_H est désignée sous différentes appellations qui se veulent synonymes. En voici certaine d'entre elles : toit vert, toit végétal, toiture végétalisée, toiture jardin, écotuit, *etc.* À noter que la précision de « toiture » implique la notion d'imperméabilité du système, notion non contenue dans le terme PCV_H qui est beaucoup plus général.

Composition structurelle

Une PCV_H est un système pouvant apparaître selon différentes formes répondant toutes à une composition structurelle de base. Ces éléments structuraux étant uniquement définis par leurs actions,

1. Elles étaient auparavant uniquement étudiées et promues par un petit nombre d'écologistes, à cette époque considérés quelque peu en marge de la société.

il existe donc une très grande liberté d'adaptation du système aux diverses nécessités et besoins propres à chacune des installations.

Une PCV_H (Fig. I.1) est structurée en cinq parties ayant des fonctions particulières : (1) la structure porteuse, (2) l'isolation (thermique et hydrique), (3) le complexe hydraulique, (4) le substrat de croissance et (5) la végétation.

Les types de végétation

Les caractéristiques intrinsèques d'une PCV_H sont toutes reliées à un paramètre majeur définissant ces dernières, il s'agit du type de végétalisation. Ils sont au nombre de trois : intensive, semi-intensive ou extensive (Fig. I.1). en voici une définition succincte :

Intensive

La végétation intensive est caractérisée par son aspect en tout point semblable à un jardin « terrestre » traditionnel. Une des grandes qualités de ce type de végétation est l'accessibilité de l'espace aux occupants du bâtiment.

Le choix des plantes est quasi illimité (feuillus, conifères, plantes grimpantes et herbacées, bulbes ou fleurs d'été, *etc.*).

Répondant aux contraintes de besoins racinaires et de prise au vent, l'épaisseur du substrat est supérieure à 30 cm, impliquant une charge permanente supérieure à 600 kg.m⁻². Pour des raisons de mouvement de substrat et d'évacuation d'eau, la pente du toit doit être comprise dans l'intervalle 3% à 5% [2].

Semi-Intensive

La végétation semi-intensive est caractérisée par un substrat allant de 12 à 30 cm. Cette épaisseur moyenne induisant une charge de 150 à 350 kg.m⁻². La pente du toit est alors comprise dans l'intervalle 3% à 30% [2]. Considérant la quantité assez faible de substrat, ce type de végétation peut souvent être appliqué en rénovation.

Le spectre des plantes utilisables couvre toutes les plantes de la végétation intensive hormis celles ayant une forte prise au vent, nécessitant un grand espace racinaire ou ayant un poids important.

Extensive

La végétation extensive est caractérisée par un substrat de faible épaisseur (4 à 15 cm). De plus, elle est positionnée sur une paroi difficilement accessible ayant une pente de toit comprise dans l'intervalle 3% à 30% pour les constructions traditionnelles. Considérant la faible charge permanente due au substrat (60 à 180 kg.m⁻²), ce type de végétalisation peut être mis en place sur tous les types de toitures (acier, bois ou béton) aussi bien en rénovation qu'en construction [2]. Le choix des plantes est principalement restreint à des espèces résistantes créant une couverture végétale dense, uniformément répartie et nécessitant un faible enracinement.

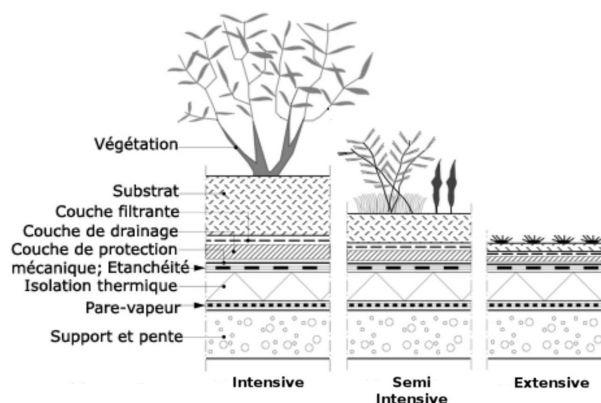


Figure I.1 – Représentation schématique de la composition d'une PCV_H (crédit CSTC NIT)

Application à l'île de La Réunion

Les intérêts

Outre l'impact politique, dû à la participation aux projets tels GERRI ou Île Verte, l'utilisation de PCV_H sur l'île de La Réunion a de réels avantages, en voici les principaux. Les effets cités sont à moduler en fonction de la composition de la PCV_H étudiée (épaisseur du substrat, *etc.*).

L'environnement

La Réunion est un site exceptionnel en terme de biodiversité. Or, depuis 1960, l'étalement urbain et sa cinétique ont eu pour conséquence de réduire considérablement la diversité du vivant dans les zones urbaines. Cette disparition de faune et flore s'expliquant principalement par l'augmentation des surfaces minérales, au détriment des espaces végétalisés, réduisant d'autant les habitats nécessaires à leurs survies. Les PCV_H permettent d'augmenter les surfaces végétalisées et ainsi de recréer un biotope

susceptible d'accueillir une faune/flore variée. À terme, la symbiose des espèces permet de créer un écosystème à part entière, augmentant ainsi la biodiversité urbaine tant affaiblie.

Les précipitations

La gestion des eaux pluviales est une problématique très importante à La Réunion en raison de la quantité et de l'aspect soudain des précipitations. Afin de réduire le débit des eaux pluviales et retarder le front d'écoulement, l'utilisation de PCV_H s'avère performant [3,4]. La rétention est faite par le milieu poreux, dont l'eau s'évapore ou est absorbée par les plantes. À noter qu'une attention particulière est à apporter quant à la tenue de la PCV_H face au ravinement des eaux de pluie lors d'un cyclone, où bien de la tenue du substrat et des plantes face aux bourrasques de vent.

La Durabilité

Le climat tropical a beaucoup d'avantages, mais concernant les matériaux, l'impact du sel, de l'humidité et d'une forte insolation est quasiment toujours synonyme de réduction de temps de vie. Le complexe de végétalisation agit comme une protection mécanique et radiative (IR et UV) qui contribue largement à accroître la pérennité du revêtement d'étanchéité (facteur 2 observé), et donc de la toiture [4]. À noter qu'elle permet également de lutter contre l'arrachement de la toiture, risque majeur en période cyclonique.

Thermique

L'insolation journalière (notamment en période estivale) conduit les surfaces minérales à stocker la chaleur et à la restituer la nuit, c'est l'origine de l'effet d'îlot urbain [4]. Les PCV_H permettent de lutter contre celui-ci grâce à une importante densité foliaire [5] limitant les apports énergétiques de la paroi. La protection solaire apportée par les PCV_H est manifeste [6]. Elle permet de diminuer la température de paroi de 60°C à 30°C en été [5] et de réduire les pics de consommation de climatisation de 25% [7]. Toutefois, la résistivité d'une PCV_H n'est pas constante [4]. La question de son évolution dans le climat tropical humide de La Réunion, et de son adaptation aux nombreux microclimats de l'île est donc posée.

Conclusion

Les intérêts des PCV_H sont manifestes, ils permettent de répondre à des problématiques variées présentes sur l'île de La Réunion telles que les protections thermiques, gestion des eaux de pluies, amélioration de la biodiversité en ville, durabilité des toitures et bien d'autres non développées ici. Toutefois, bien que les PCV_H soient connues depuis des millénaires, diverses questions restent sans réponses à l'heure actuelle, nécessitant des travaux de recherche. Il s'agit principalement de l'évolution de la résistance thermique au cours de l'année en fonction des divers microclimats ainsi que de la tenue mécanique (et thermique) face aux conditions cycloniques.

Références

- [1] Sabre M., Bulteau G., « Végétaliser les toitures et terrasses » ; revue *Pour la science*, n°403 Mai 2011.
- [2] ADIVET, CSFE, SNPPA, UNEP, « Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation, des terrasses et toitures végétalisées », édition n°2, novembre 2007.
- [3] Carter T., Jackson C.R., « Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales », *Landscape and Urban Planning*, 80, (2007) 84–94.
- [4] Liu K.K.Y., « Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation », RCI 18th International Convention and Trade Show (Tampa, Florida, 3/13/2003), pp. 1-15, March 01, 2003 (Paper also published in *Interface - Journal of the Roofing Consultants Institute*, v. 22, no. 2, Feb. 2004, pp. 4-12) (NRCC-46294).
- [5] Tan P.Y., Wong N.H., Chen Y., Ong C.L., Sia A., « Thermal Benefits of Rooftop Gardens in Singapore », *Greening Rooftops for Sustainable Communities*. Chicago, 2003.
- [6] Liesecke H.-J., Krupka B., Brueggemann H., « Grundlagen der Dachbegreenung Zur Planung, Ausführung und Unterhaltung von Extensivbegreenungen und Einfachen Intensivbegreenungen », Patzer Verlag, Berlin – Hanover, 1989, p.28.
- [7] Christian J.E., Petrie T.W., « Sustainable Roofs with Real Energy Savings », *Proceedings of the Sustainable Low-Slope Roofing Workshop*, ed. Desjarlais, A., Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 1996, p.99.

Section J

Regard croisé sur les PCV_{ce} à La Réunion et à Hong-Kong

Cette annexe a pour fonction la reproduction de l'article présenté au congrès ICRET¹ 2014 et publié dans la revue *Applied Mechanics and Materials*. Elle présente un regard croisé sur les PCV_{ce} à La Réunion et à Hong-Kong, tous deux soumis à un climat de type tropical humide.

N.B. : L'article et la présentation sont accessibles sur HAL [JEAN et al., 2014].

Vegetalized Complex Partition (VCP) : Impact of a green roof under a humid tropical climate, comparison between Hong Kong and Reunion Island.

Aurélien P. JEAN^{1,a,*}, Teddy LIBELLE^{1,b}, Frédéric MIRANVILLE^{1,c}, Mario A. MEDINA^{2,d}

¹ Physics and Mathematical Engineering Laboratory for Energy and Environment, University of Reunion, France

² Civil, Environmental and Architectural Engineering Department, The University of Kansas, USA

^aaurelien.jean@univ-reunion.fr, ^bteddy.libelle@univ-reunion.fr, ^cfrederic.miranville@univ-reunion.fr,

^dmmedina@ku.edu

Keywords : Vegetalized complex partition ; VCP ; Green roof ; *Zoysia tenuifolia* ; Thermal impact ; Energy performance ; Tropical environment.

Abstract

The aim of this paper is to present the experimental results of a specific vegetated complex partition (VCP) and discuss the conclusions found from an interesting study case in Hong Kong, especially the presence of a strong upward heat flux in winter.

The experimented VCP configuration have never been tested in Reunion Island. It is located on a small scale building with a sloped roof covered with steel foil and under a humid tropical climate. From March to August, the extensive VCP reduced the global average heat flow by 91.6% and the ceiling temperature by 9.3°C, with a maximum average reduction of 18.9°C at noon.

Compares to the results from Hong Kong, three of the four conclusions have been observed or deduced from the experimented VCP's results. The fourth conclusion (about heat flow loss in winter) have not been observed. But, based on the results, a precision of the explanation of its origin is proposed : the evaporation process act like an heat loss amplifier.

1. ICRET : *International Conference on Renewable Energy Technologies*.

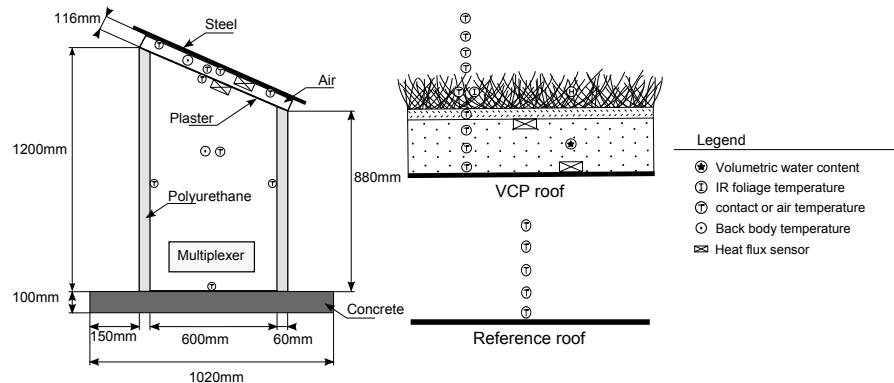
Introduction

Vegetalized complex partition (VCP), such as green roofs, are a very interesting research subject. Since the first published study, in 1977 [1], the specific knowledge of these specific partitions have been rising, but we are far from a full understanding of its thermal field evolution (spatially and temporally). In fact, a full understanding would be almost impossible considering the cross discipline aspect of this study field (thermal and mass transfer, biological and chemical process, etc.). But using some assumptions, we can simplify enough the subject to understand it, and to be able to predict its evolution. To achieve this goal, numerous of experiments were conducted in continental [2], temperate [3,4] or Mediterranean [5,6] climates. But only a very few have been done in a humid tropical climates [7,8]. However, one of these study showed very interesting results. In Hong Kong, the vegetalized complex partition (VCP) did act, as expected, as an isolation by summer but in winter it acts as a heat loss amplifier [9]. Considering these remarks, an experiment has been conducted under a humid tropical climate (Reunion Island). This one had two objectives : first to know the impact of a VCP on a building thermal field, and secondly to check if the specific winter heat loss depicted [9] can happen with an extensive VCP in Reunion Island.

Experimental design and data acquisition

As introduced, an experiment have been conducted under a humid tropical climate. By convenience, the VCP is installed on a small scale building (one third), called "ISOTEST". The ISOTEST have four walls filled with polyurethane² creating a volume of 0.36 m³, which is hermetically sealed and fully validated by numerous previous experiments [10]. The roof of the ISOTEST structure have a slope of 27° and is composed by 8mm of plaster board, 116mm of air and 1mm of steel foil (fig. 1). This plain configuration is used as reference design. By opposition, the VCP design is composed by a plain ISOTEST on which substrate (80mm) and vegetation (40mm) are installed (fig. 1). The substrate is made of lava-rock (average diameter : 20mm) and organic amendment, respectively at 85% and 15%. On the top of the substrate is situated the vegetation : "*Zoysia Tenuifolia*". This kind of grass, naturally present in Reunion Island, have coverage rate of ~100% and possess a temporal and spatial homogeneity (figure 1).

Figure 1
The ISOTEST small scale building and its two roof configurations : reference and VCP.



About the sensors, contact and air temperatures are obtained by type T thermocouples, while grass foliage temperature is acquired by an infra-red thermometer. The heat flux is measured by a thermopile. Two types are used in function of the location : a thin one (Captec) is used under the steel foil of the roof, and considering the mechanic conditions, a protected one is placed into the substrate (HPF01). The volumetric water content is obtained by a reflectometric sensor (CS616). All of these probes are connected to a data logger (CR3000), directly or through a multiplexer (AM25T). Finally, a computer record automatically each sample under a ".csv" text file (figure 2).

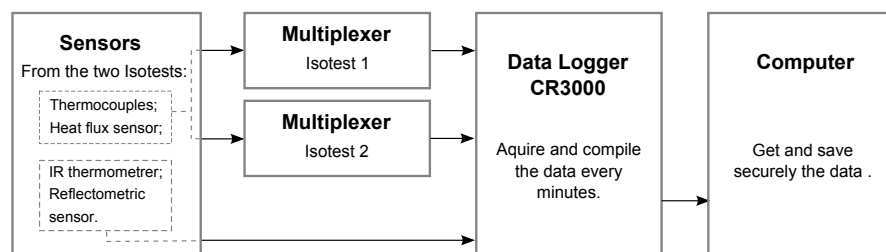
Experimentation

Localized in Saint-Pierre, French city of Reunion Island (situated in the Indian Ocean : 21°19' S, 55°28' E), the experimentation has been conducted from mid March to mid August 2014, so covering almost half of the summer and winter periods. Evolving during this period, the meteorological conditions are succinctly presented by the next paragraph.

2. The walls are made of the partition used for the conception of cold chambers.

The daily average temperature of ambient air is from 26.7°C to 21.2°C with a diurnal evolution of 8°C. Unlike the air temperature, relative humidity's daily average is almost constant at 75% with a diurnal evolution of 30% within all the experimentation. The maximum solar irradiation (at noon) evolves from March to August respectively from 1000 W/m² to 600 W/m². And to finish, the wind speed at 2 meter evolves from 1.8 m/s to 2.4 m/s with some fluctuations (± 1 m/s) and specific events (without seasonality).

Figure 2
Synoptic of
the data
acquisition.



Results and discussion

According to the result, the VCP allows to reduce the heat flux through the steel foil. Compared to the reference roof, 94.6% of the heat gain into the building and 88.6% of the heat loss are erased. These percentages are very high and have to be used with precaution, especially the heat loss reduction. Indeed, in this context the reduction happens only because there is no heat to release, since the only heat production comes from the solar irradiation (there is no heat production inside the building). Moreover, considering the phenomena inside the VCP it is very hazardous to extrapolate this loss reduction to a case with heat production.

Table 1 – Differences between the reference ISOTEST and the VCP ISOTEST (average from March to August)

	Heat Flux		T_{steel}		T_{air}		T_{plaster}	
Average	Gain	Loss	ΔT	ΔT^{max}	ΔT	ΔT^{max}	ΔT	ΔT^{max}
	94.6%	88.6%	20.3 \pm 11.0°C	41.4°C	4.5 \pm 3.1°C	10.3°C	9.3 \pm 5.8°C	18.9°C

Where ΔT represent the average temperature difference between the two configurations.
The temperature and heat flux measurement errors are respectively : $\pm 1^\circ\text{C}$ and $\pm 6.4\%$.

The modification of the heat flux impact also the temperatures (detailed into the table 1). For example, the most important modification is observed on the steel foil, who sees its temperature lowered by 20.3 \pm 11.0°C, with a maximum reduction of 41.4°C at noon (which represent 57%). *Nota* : because of the circadian seasonality the standard deviation is usually important. So, the most representative key parameter is the temperature difference at noon : ΔT^{max} .

Considering this design, under these specific conditions, and by the hypothesis of quasi-static state, the experimented VCP can be globally approximated by a thermal resistance of $R_{vcp} = 0.302 \pm 0.016 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$. This resistance cover the vegetation and substrate layers, who respectively can be approximated by $R_{veg} = 0.051 \pm 0.003 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ and $R_{sub} = 0.250 \pm 0.013 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$. The dissociation of R_{vcp} into R_{sub} and R_{veg} lead to an intrinsic thermal property of these specific layers : their thermal conductivities. With a depth of 40 mm and 80 mm, for the vegetation and the substrate, it appears : $\lambda_{sub} = 0.319 \pm 0.017 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ and $\lambda_{veg} = 0.775 \pm 0.046 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ($\lambda_{vcp} = 0.397 \pm 0.022 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

From another point of view, the VCP impact can be characterized by the averaged heat flux density reduction between the reference and the VCP ISOTESTS (loss and gain combined). With an averaged heat flux density reduction of $8.19 \pm 0.41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, the tested design allows an energy³ consumption economy of $30.0 \pm 1.5 \text{ kWh/m}^2$ over the five months of the experiment.

About the origin of these results, since the only present heat source is the solar irradiation, the main factor seems to be the radiative protection created by the VCP. But, this is not the only phenomenon who is able to lead to a heat gain reduction. Indeed, the inertia of the system possess the capacity of delaying the heat flux and lowering its intensity (both visible in figure 3). A third phenomenon is

3. In this case the hypothesis of a performance coefficient of 1 is made, so one thermal kWh equal one electric kWh.

the vaporization of the water, by evaporation into the substrate or by plant's transpiration. But the substrate have a very little water retention capacity over few days, explaining the very low volumetric water content. So the thermal impact mainly comes from the inertia and the radiative protection.

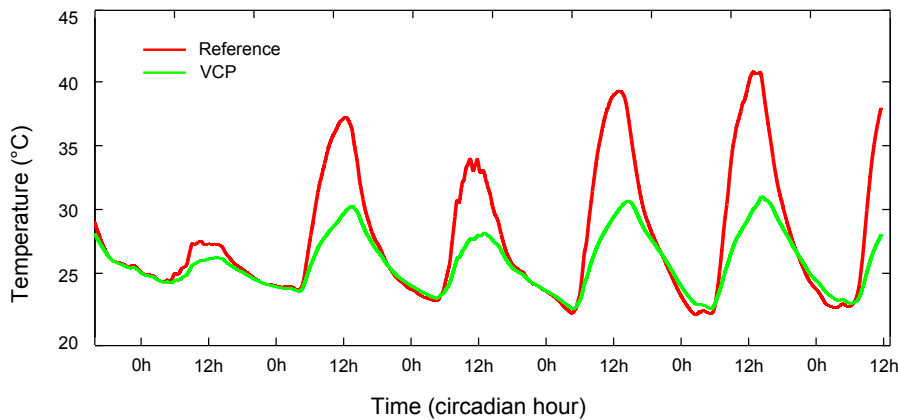


Figure 3
Evolution of
the reference
and VCP
ISOTEST air
temperature
from the 23rd
to the 28th of
March 2014.

To finish, a particularity of these results is the low seasonality variation. This behavior is explained by the low variation of the climatic conditions, coupled with an absence of inside heating source and most of all a very low volumetric water content.

Comparison between results in Hong Kong and in Reunion Island

Based on Jim and Tsang experiment [9], the goal of this section is to highlight the similarities and differences between their conclusions and the results presented previously.

The Jim and Tsang's experimental design describes a sky woodland over 150 m², involving a 100 cm thick layer of soil, composed of 80 cm subsoil and 20 cm topsoil enriched with mature compost. The trees have a final height of 5-10 m. So, except for the similar climate (humid tropical), this experimental design is very different from the one presented in this paper.

Nota : these differences impact the observed phenomena only by modulation of their intensities, which explain the obtained similarities. Below is synthesized the four remarks (in *italic*) of Jim and Tsang, followed by our results, conclusion and/or propositions.

1. *"The transpiration rate varies widely depending on seasonal and weather conditions"*
The transpiration rate have not been measured, but considering the very low volumetric water content of the substrate, and its evolution, the vegetation layer do absorb a large amount of stored water. Furthermore, this substrate water content reduction is strongly linked to the solar radiation. So, the vegetation being healthy, the evapotranspiration rate (these two phenomena cannot be dissociated here) varies widely depending on seasonal and weather conditions.
2. *"The tree canopy layer could reduce solar radiation reaching the soil surface"*
At mid-day, the average temperature reduction between the top of the substrate and vegetation layers is about 47±5%. Since the transpiration rate is low (because of the low volumetric water content), most of the impact comes from the reduction of the solar radiation reaching the soil surface. So the canopy do act as a radiative shield.
3. *"The soil substrate layer of the intensive green roof can be considered as a large heat sink on the rooftop to reduce temperature fluctuation"*
The experimented VCP is extensive, but even with 80mm of lava-rock the inertia's impact can be observed, delaying the heat flux and lowering its intensity (fig. 3). So, a substrate layer can be considered as a large heat sink to reduce temperature fluctuation.
4. *"In winter, the subtropical intensive green roof triggers notable upward heat flow from the substrate to the ambient air"*
This "notable upward heat flow" have not been observed during the experiment. This difference allows to investigate (by comparison) the origin of this peculiar phenomenon. According to Jim and Tsang, the upward heat flow comes from the negative temperature difference between the substrate and the inside air temperature, which induces some sensible and latent thermal transfers.

Considering these conclusions and our results, the origin of the temperature difference (so the upward flow) can be explained by two set of parameters : the VCP design and the meteorological conditions. Indeed, the VCP design's choice defines its thermal characteristics and phenomena intensities (ex : the water retention capacity influence the evaporation phenomenon, etc.). Among these phenomena, evaporation is able to impact (lower) the thermal filed into the VCP, even with low solar radiation (or by night). But, as long as there is no hydric stress, it is essentially governed by the air relative humidity and wind speed.

So, the upward heat flow in winter could comes from a high substrate water content, acting as heat loss amplifier through evaporation process if associated with the adequate relative humidity and wind speed.

Nota : several combinations of meteorological conditions can lead to the same evaporation rate.

Conclusions

This paper presents, in a first place, the results and discussions about an experimented vegetated complex partition (VCP) on small scale building and under a humid tropical climate. Then a comparison is made with the conclusions of a study made in Hong Kong.

Over five months (March to August), the extensive VCP shows some very interesting heat flow reduction compared to the reference building (global average of 91.6%). This lead to reduce the ceiling temperature by $9.3 \pm 5.8^\circ\text{C}$, with a maximum average reduction at noon of 18.9°C . The data manipulation allows to get the VCP resistance $R_{vcp} = 0.302 \pm 0.016 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, then the substrate (lava-rock) and vegetation (*Zoysia tenuifolia*) layer conductivities : $\lambda_{sub} = 0.319 \pm 0.017 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ and $\lambda_{veg} = 0.775 \pm 0.046 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Globally, the VCP induces a reduction of $8.19 \pm 0.41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, which allows an energy consumption economy of $30.0 \pm 1.5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$. So, this solution is thermally efficient.

Compares to the results from the Hong Kong's study, similar conclusions or deductions are made about three aspects including : the seasonal and weather conditions impact on the transpiration rate; the canopy layer radiative shield property; and the substrate layer inertia. The fourth conclusion focused on a winter upward heat flow from the substrate to the ambient air. This phenomenon has not been observed, but a comparative study of the set-up allowed to propose a precision about its origin. This upward heat flow seems to be governed by the meteorological conditions and VCP water content, the evaporation process acting like an heat loss amplifier.

Références

- [1] Hoeschele, K. and Schmidt, H. Klimatische wirkung elner dachbegrunung. Garten u Landschaft, 87 (1977) 334–337.
- [2] Alar Teemusk, Ülo Mander, "Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems", Ecological Engineering, 36 (2010) 91–95
- [3] Liesecke, H.-J., Krupka, B., and Brueggemann, H. "Ausführung und unterhaltung von extensivbegrunungen und einfachen intensivbegrunungen." In Grundlagen der Dachbegrunung Zur Planung, page 18, Patzer Verlag, Berlin - Hannover, 1989
- [4] Renato M. Lazzarin, Francesco Castellotti, Filippo Busato, "Experimental measurements and numerical modelling of a green roof", Energy and Buildings, 37 (2005) 1260–1267.
- [5] R. Fioretti, A. Palla, L.G. Lanza, P. Principi, "Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate", Building and Environment, 45 (2010) 1890–1904.
- [6] Eumorfopoulou E, Aravantinos D., "The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece". Energy and Buildings, 27 (1998) 29–36.
- [7] Wong NH, Tay SF, Wong R, Ong CL, Sia A. "Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore." Building and Environment, 38 (2003) 499–509.
- [8] C.Y. Jim and Hongming He, "Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem", Ecological Engineering, 36 (2010) 1052–1063.
- [9] C.Y. Jim and S.W. Tsang, "Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof", Building and Environment, 46 (2011) 1263–1274.
- [10] Bigot, D., Miranville, F., Fakra, A., and Boyer, H. 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(9) :1117–1126, 2009.



Université de La Réunion

Laboratoire PIMENT, Pôle PhyBât
117 rue du général Ailleret
Bâtiment L
97430 Le Tampon
FRANCE

Tel: (+262) (0)262 579 245

Fax: (+262) (0)262 579 540

Courriel: aurelien.jean@univ-reunion.fr

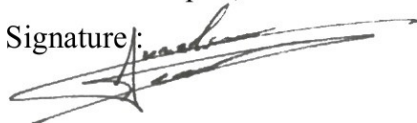
<http://personnel.univ-reunion.fr/ajeau>

LETTRE D'ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT

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

Fait à Le Tampon, le 22 février 2016

Signature :



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

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

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

En conséquence, chaque utilisateur doit :

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

La contrefaçon et le faux

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

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

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

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

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

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