



HAL
open science

Contribution à l'Étude des Parois Complexes Végétalisées (PCV): 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 (PCV): Évaluation de la Performance Énergétique Globale en Climat Tropical Humide. Thermique [physics.class-ph]. Université de La Réunion, 2015. Français. NNT: . tel-02470090v1

HAL Id: tel-02470090

<https://hal.science/tel-02470090v1>

Submitted on 6 Mar 2018 (v1), last revised 7 Feb 2020 (v2)

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

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

Copyright

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	Examinateur	<i>Professeur Université de La Réunion, France</i>
Stéphane GUICHARD	Examinateur	<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 a 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 LÉCHAUDEL 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 référencé¹.

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 entrefiletés 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 \LaTeX , distribué gratuitement sous licence LPPL. Basé sur \TeX ⁴, \LaTeX ⁵ 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 \LaTeX est principalement due aux fontes propres à \TeX , 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 \LaTeX ce calcul est aisément implémenté et automatiquement actualisé.

4. \TeX est un langage de programmation compilé dédié à l'édition. Il a été inventé par D. KNUTH.

5. \LaTeX a été inventé par L. LAMPORT.

6. Infiniment modulaire, les capacités de mise en forme de \LaTeX 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 codes 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

