HAL
open science

Développement, par une approche systémique, d'expérimentation, de modélisations et d'outils numériques autour de l'énergie, l'environnement et les espaces bâtis

Ali Hamada Fakra

To cite this version:

Ali Hamada Fakra. Développement, par une approche systémique, d'expérimentation, de modélisations et d'outils numériques autour de l'énergie, l'environnement et les espaces bâtis. Génie des procédés. Université de la Réunion, 2020. tel-03166591

HAL Id: tel-03166591

https://hal.science/tel-03166591

Submitted on 15 Mar 2021

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

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

Développement, par une approche systémique, d'expérimentations, de modélisations et d'outils numériques autour de l'énergie, l'environnement et les espaces bâtis

---

Docteur / Ingénieur Damien Ali Hamada FAKRA

Soutenue le 07 décembre 2020
Version : Version définitive

Université de la Réunion

École Doctorale "Sciences, Technologies et Santé"
U.F.R Science de l'Homme et de l'Environnement (S.H.E)
Habilitation à Diriger des Recherches

Titre :

Développement, par une approche systémique, d'expérimentations, de modélisations et d'outils numériques autour de l'énergie, l'environnement et les espaces bâtis

Docteur / Ingénieur Damien Ali Hamada FAKRA

1. Rapporteur Belkacem ZEGHMATI
Université de Perpignan - Via Domitia
Professeur - Laboratoire LAMPS [EA]

2. Rapporteur Monica SIROUX
INSA Strasbourg
Professeur - Directrice du Laboratoire ICUBE [CNRS]

3. Rapporteur Corinne ALONSO
Université Toulouse III (Paul Sabatier)
Professeur - Laboratoire LAAS [CNRS]

4. Examinateur Fréderic MIRANVILLE
Président de l'université de La Réunion
Professeur - Laboratoire PIMENT [EA]

5. Examinateur Harry BOYER
Université de La Réunion
Professeur - Laboratoire PIMENT [EA]

6. Directeur de recherche Jean Claude GATINA
Université de La Réunion
Professeur - Laboratoire PIMENT [EA]

Soutenue le 07 décembre 2020

Docteur / Ingénieur Damien Ali Hamada FAKRA

Développement, par une approche systémique, d'expérimentations, de modélisations et d'outils numériques autour de l'énergie, l'environnement et les espaces bâtis

Soutenue le 07 décembre 2020

Rapporteurs : Belkacem ZEGHMATI / Monica SIROUX / Corinne ALONSO

Directeur de Recherche : Jean Claude GATINA

École Doctorale "Sciences, Technologies et Santé"

Habilitation à Diriger des Recherches

Université de la Réunion

U.F.R Science de l'Homme et de l'Environnement (S.H.E)

117 Rue du Géneral Ailleret(Campus Sud universitaire du Tampon)

97430 and Le Tampon

Abstract

This work (i.e. H.D.R) is the result of 17 years of my involvement in national education, more precisely within higher education in the field of training, administrative responsibilities, supervision, participation in projects and finally research carried out at the University of La Réunion. All these professional aspects are discussed in detail in this manuscript, and some ideas on the prospects of my future participation are presented, always in the continuity of my manager and researcher activities.

Resumé

Ce travail (i.e. H.D.R) est le fruit de dix-sept années de mon implication dans l'Éducation nationale, plus précisément au sein de l'enseignement supérieur dans le domaine de la formation, des responsabilités administratives, des encadrements, des participations dans des projets et enfin des recherches menées à l'université de la Réunion. Tous ces volets professionnels sont abordés en détail dans ce manuscrit et des pistes de réflexion sur les perspectives de mes futures implications sont présentées, toujours dans la continuité de mes activités de formateur et de chercheur.

Remerciements

C'est un exercice que je redoute car je souhaite n'oublier personne.

Je commencerai donc par remercier avant tout ALLAH, mon créateur, pour qui rien ne pourrait arriver sans sa bénédiction.

Mes remerciements iront ensuite particulièrement et chaleureusement au professeur émérite Causa, directeur de mon département de rattachement à l'UFR SHE, et à mon premier mentor, Monsieur Jean Claude GATINA. Jean Claude, merci pour ton accompagnement et tes conseils précieux. Je n'ai pas de mot qui puisse exprimer ma gratitude envers toi. Je te tutoie, car tu as été un guide pour moi et en parallèle un deuxième père. Puisse ce manuscrit te rendre fier de ce que tu as fait de moi c'est-à-dire un chercheur comblé et aguerri dans tous les sens du terme. Je sais que tu vas bientôt partir à la retraite et j'espère avoir encore d'autres occasions de continuer à travailler avec toi dans le futur. Mille fois merci pour cela.

J'adresse maintenant mes remerciements au professeur Blekacem ZEGHMATI pour l'honneur que vous m'accordez en acceptant d'être un de mes rapporteurs. Votre vision de la recherche, que j'admire, m'inspire dans ma quête sans cesse d'une méthodologie d'encadrement plus appropriée d'une équipe de recherche.

Mes remerciements vont également au professeure Corinne ALONSO pour avoir accepté de faire partie de mes rapporteurs. Ce privilège que vous m'avez offert en acceptant de rapporter mon manuscrit me conforte dans mes ambitions professionnelles. J'espère pouvoir travailler, dans un futur proche, sur une thématique commune à nos deux laboratoires de recherche.

Je remercie aussi la professeure Monica SIROUX pour avoir répondu favorablement à mon souhait de faire partie de mes rapporteurs. Puisse-t-elle trouver également dans ce modeste manuscrit une ou des pistes de collaboration sur des recherches futures communes.

Mes remerciements vont ensuite au Président de notre université, professeur Frédéric MIRANVILLE, qui a bien voulu faire partie de mon jury malgré son emploi du temps

très chargé. Je sais pouvoir toujours compter sur ta disponibilité Fred et me demande d'ailleurs comment tu fais pour gérer aussi bien autant de dossiers à la fois sans montrer la moindre fatigue ni faiblesse. Je te tutoie car je te connais depuis maintenant plus d'une quinzaine d'années. Nos chemins se sont croisés sur différentes thématiques de recherche de notre laboratoire commun. Tu as été une source d'inspiration pour moi tant dans ta rigueur, ton expertise, ton esprit critique et ton accompagnement en recherche.

Je remercie le VPCA de notre université, le professeur Harry BOYER, pour sa disponibilité et son soutien dans mes projets de recherche. Harry, un peu comme Jean-Claude, tu as aussi fait partie de mon apprentissage scientifique. Tu m'as inculqué l'approche de la recherche "simplifiée", mais "pertinante" et "efficace". En tant qu'ex-doctorant, je ne peux qu'être en admiration face à la méthodologie acquise et te suis reconnaissant pour cela. De cette affirmation découle naturellement cette question, à savoir, qui est mieux placé que toi pour connaître mon parcours de chercheur et donc faire partie des examinateurs de ce manuscrit? Merci d'avoir répondu favorablement à mon invitation, Harry.

Je remercie l'ensemble de l'équipe pédagogique de la Faculté des Sciences et Techniques de l'université des Comores pour les nombreux projets de recherche et de formation, que je ne pourrais tous citer ici, développés en commun (Halassi, Bacar, Mmadi, Soulé, Hamidou, Amariliss, Nasser, etc.) pour le bien de nos deux institutions.

Un remerciement très particulier au département Génie Industriel de l'IST d'Antananarivo pour les nombreuses collaborations et la confiance que l'équipe le constituant a su montrer à mon égard vis-à-vis de la recherche développée en commun : un grand merci à Luc RAKOTO (le Directeur de GI), Pr. José Marie Michel ANDRIAMAMPIANINA, Dolly (enseignant chercheur permanent), Mirantsoa Volana RANDRIAMANDIMBISOA (enseignante chercheuse permanente), Domoina Lucia RAVOAJANAHARY (ingénieure stagiaire), Ando Ny Aina RANDRIANTSOA (ingénieur stagiaire), Ny Aina Manitra Nany RAZAFINDRALAMBO (Ingénieur) et j'en passe. Participer au développement de la stratégie de recherche du département Génie Industriel et accompagner l'IST dans l'encadrement de son personnel de recherche est un réel plaisir et un immense honneur pour moi. Un grand merci également à l'ensemble du personnel administratif, pédagogique et technique de l'IST d'Antananarivo.

Je remercie l'équipe du laboratoire PIMENT qui a travaillé avec moi sur mes nombreuses thématiques de recherche : Dominique MORAU, jean-Phillipe PRAENE, Bruno MALET-DAMOUR ou encore Dimitri BIGOT, pour ne citer que ceux-là, mais aussi notre seul et unique technicien de laboratoire, Jérôme VIGNERON.

Et enfin, mes remerciements vont à l'ensemble de l'équipe du département Science du Bâtiment et de l'Environnement (Fiona BENARD, Vincent FONTAINE, Mamy Harimisa

RADANIELINA, Garry RIVIERE, etc.) au Tampon et Génie Civil à l'IUT de Saint-Pierre pour la convivialité et confiance qu'ils ont eue à mon égard en tant qu'intervenant dans des modules d'enseignement.

À mes doctorants, aux docteurs, aux ingénieurs stagiaires et stagiaires de tout niveau que j'ai encadrés ou dont j'ai participé à l'encadrement durant toutes ces années : un grand merci à toutes et à tous pour ces moments de partages de connaissances et d'échanges. Vous avez été à la hauteur de mes attentes et pouvez être fier de vous. Ce manuscrit vous est à toutes et tous dédié.

À ma famille, plus particulièrement ma reine Naama ainsi que mes deux princesses Intissar et Ibtihal.

Table des matières

I Synthèse de mes activités de recherche **5**

II Synthèse des enseignements et encadrements **129**

III Responsabilités administratives et participation à des projets de recherche et de formation **145**

IV Conclusion générale et perspectives **159**

1 Présentation générale du manuscrit

> *En essayant continuellement on finit par réussir. Donc : plus ça rate, plus on a des chances que ça marche.*
>
> — **Devise SHADOK**

Le rapport sera structuré en quatre parties : la première partie, qui est la plus longue, concerne la description de mes activités de recherche les plus récentes. La deuxième partie aborde en détail mes activités d'enseignement et d'encadrement durant ces dix dernières années. La troisième partie traite de mes responsabilités administratives et ma participation à des projets de recherche et de formation. Enfin, la quatrième et dernière partie est consacrée à mes perspectives futures en recherche, en enseignement, en encadrement et en responsabilités administratives ainsi que mon implication dans des projets antérieurs, en cours et postérieurs. Ci-dessous les résumés de chacun des chapitres constituant le rapport de mon H.D.R.

Partie I : Activités principales de mes recherches (chapitre 2 à 9)

La partie débutera avec une introduction de mes orientations et des liens existants entre les sujets des recherches que j'ai menées durant ces dix dernières années. Les domaines très variés de recherche sur lesquels j'ai travaillé concernent l'énergétique, la physique du bâtiment et l'environnement. Deux thématiques principales sont décrites dans ce chapitre : une thématique en lien avec la métrologie et une autre qui traite des outils numériques dédiés chacun à l'un de ces trois domaines de recherche. L'ensemble des travaux réalisés est basé sur la même et unique démarche de modélisation dite par "approche systémique" (c.à.d. à partir de variables d'entrées, de variables de sorties et de paramètres reliés entres eux par des fonctions soit linéaires pour la plupart, soit non linéaires dans certains cas. Ces fonctions deviennent alors des modèles de prédiction). Ainsi, non seulement une nouvelle génération de capteurs basés sur des modèles systémiques ont pu être fabriqués et testés, mais de plus des algorithmes originaux de codes de calcul numérique basés aussi sur cette même logique d'approche systémique ont pu être proposés lors de ces travaux. Au final :

- trois codes de calcul numérique dans trois environnements informatiques différents (en langage C, sous E.E.S et sous Matlab) ont pu être mis en place : l'un dans la simulation numérique (en 3D) de l'optique du bâtiment, le second dans la simulation numérique (en 2D) du mix énergétique multi-échelle et enfin un troisième dans la simulation numérique (en 1D) d'un système à énergie renouvelable permettant de valoriser les déchets et respectueux de l'environnement ;
- et trois dispositifs de mesure ont été conçus. Il s'agit : d'un analyseur de gaz combustible amélioré, d'un appareil permettant de caractériser des propriétés thermo-optico-physiques des matériaux de construction innovants et d'un biocapteur météorologique (microclimat) dédié au confort humain dans un espace bâti (ambiance intérieure).

Dans cette même partie nous présenterons également une synthèse des autres pistes de recherche en lien avec des thématiques transdisciplinaires et/ou transversales - entre l'énergie et l'habitat - qui nous ont intéressés durant ces dix-sept années, en plus des

synthèses sur la métrologie et les outils numériques développés auparavant. Il s'agit notamment des études sur des matériaux innovants qui parfois produisent de l'énergie et sont destinés à être intégrés dans l'enveloppe du bâtiment.

Partie II : Activités d'enseignement et d'encadrement (chapitre 10 à 12)

Mon parcours atypique dans l'enseignement supérieur et en encadrement au niveau national ainsi que mon profil de formateur/encadrant expert en instrumentation et expérimentation scientifique au service d'autres institutions internationales seront décrits dans cette partie.

Partie III : Responsabilités administratives et implication dans des projets de recherche et de formation (chapitre 13 à 15)

Dans cette partie il sera question de présenter mes implications les plus récentes dans des tâches administratives de mon université de rattachement ainsi que ma participation dans des projets de recherche et de formation.

Partie IV : Conclusion et perspectives futures (chapitre 16 à 17)

Cette dernière partie du manuscrit sera consacrée à la description de mes futures implications (à cours, moyen et long termes) en recherche, en enseignement, en encadrement, en administration et en projets toujours dans la continuité de mes fonctions (ingénieur, chercheur, vacataire et expert) et responsabilités que j'ai assurées depuis les années 2006 jusqu'à nos jours.

Première partie

Synthèse de mes activités de recherche

Six sujets de recherches transversales et préalablement sélectionnées seront présentés dans ce chapitre : il s'agit d'études en confort humain dans le bâtiment, d'un système de production d'énergie renouvelable dédié à la consommation dans l'habitacle, du pilotage multi-échelle du mix énergétique d'un réseau électrique, d'une méthode simple pour caractériser les matériaux de construction, de l'analyse d'un biocarburant et enfin de la conception d'une nouvelle génération de biocapteur destiné aux mesures d'un microclimat. Toutes ces recherches ont pour objectifs d'étudier le confort humain et de répondre aux besoins d'une consommation énergétique qui ne cesse de s'accroître tout en préservant la nature.

2 Introduction aux problématiques générales de mes recherches

Le laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie et l'environnemENT (PIMENT) auquel je suis rattaché mène des recherches sur trois axes :

- un premier axe principal dénommé "Efficacité Energétique des Espaces Bâtis et Environnement" (EEEBE) ;
- un deuxième axe principal intitulé "Energie Durable" (ED) ;
- et un troisième axe transversal appelé "Mathématique et Application" (MA).

Ces axes de recherche ont été définis par rapport à la politique nationale et régionale de la transition énergétique (intégration des ENR dans l'enveloppe des systèmes bâtis et MDE des espaces bâtis) et à la stratégie de performance des outils de planification énergétique du pays, respectueux de l'environnement et couplés aux systèmes bâtis. La particularité insulaire de l'île de la Réunion rend encore plus intéressante cette politique de par la forte croissance, d'année en année, de ces énergies intermittentes. Les problèmes liés à cette transition énergétique ne peuvent se résoudre que par la connaissance et la maîtrise des multiples formes de systèmes énergétiques de type ENR existants dans le monde, le développement d'outils numériques dédiés aux comportements et à la performance énergétique de ces systèmes, à la qualité de l'air et du confort des ambiances intérieures et à la caractérisation des composants innovants utilisés dans l'enveloppe de ces systèmes bâtis en vue d'optimiser en temps réel à la fois le confort et l'énergie. Mes recherches rejoignent ces champs multidisciplinaires. J'ai ainsi contribué :

1. au développement de deux modèles, intégrés dans un outil d'aide à la décision, pouvant être utilisés dans l'étude de confort visuel et correspondant au sujet de recherche 1 développé dans ce manuscrit ;
2. à la conception d'un dispositif expérimental permettant de caractériser les propriétés thermo-optico-physiques d'un matériau de construction innovant et ainsi de connaître l'influence thermique et optique de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort humain (voir le sujet de recherche 2) ;
3. à la conception d'un biocapteur dédié à l'étude des indicateurs de confort humain à l'intérieur d'un bâtiment ou/et espace bâti et qui fait l'objet de notre sujet de recherche 3 ;
4. au développement d'un outil de dimensionnement et d'optimisation de forme d'un gazogène destiné à produire de l'électricité à partir de déchets (biomasse), que nous verrons dans le sujet de recherche 4 ;

5. à la conception d'un analyseur low-cost destiné à mesurer le potentiel énergétique d'un biogaz pouvant servir de carburant (voir le sujet de recherche 5) ;
6. à la mise en place de nouveaux algorithmes de calcul permettant non seulement de piloter un mix énergétique de systèmes et espaces bâtis, mais également de pouvoir visualiser (en 2D) ce pilotage en temps réel (voir le sujet de recherche 6).

Dans ce qui va suivre, nous verrons plus en détail les verrous, les solutions apportées ainsi que les résultats obtenus sur ces six sujets de recherche.

3

Modélisation photométrique et développement d'un outil de simulation numérique (3D) autour des questions du confort visuel dans le bâtiment

Les travaux que nous comptons présenter dans ce sous-chapitre reposent essentiellement sur les recherches que j'ai menées depuis la période de préparation de mon diplôme de doctorat (3ème cycle) jusqu'à nos jours. Cette étude traite des problématiques de modélisation complexe dans le domaine du confort humain à l'intérieur d'un habitat (ambiance intérieure), plus particulièrement du confort visuel et thermique intérieur en milieu tropical humide insulaire.

Table des matières du chapitre 3

3.1 Historique du logiciel CODYRUN 10

3.2 Contexte et problématique scientifique 10

3.3 Outils et méthodologie développés 12

3.4 Résultats des travaux scientifiques réalisés 14

3.5 Publications, projets/financements et brevet associés au sujet 1 18

Sélection synthétique de la bibliographie sur le sujet 1 : logiciel CODYRUN 21

3.1 Historique du logiciel CODYRUN

Ce logiciel est décrit dans de nombreux articles du laboratoire PIMENT (voir [Boy+96], [Boy+98], [Boy+99], [GB+02], [Luc+02] et [Ade+98]). CODYRUN est le premier logiciel en thermique du bâtiment conçu par le laboratoire PIMENT. Le concepteur du logiciel, le professeur Harry BOYER qui a été également mon directeur de thèse, m'a donné l'opportunité de travailler sur cet outil d'aide à la décision. C'est dans ce contexte que j'ai pu apporter ma contribution en développant et en y insérant des codes de calcul liés à l'éclairage aussi bien intérieur (éclairement naturel et artificiel en 3D) qu'extérieur (gisement solaire lumineux). Les travaux se sont poursuivis plus tard avec d'autres doctorants sur la base des études antérieures et avec ma participation. A ce jour, l'outil est capable de simuler : la thermique du bâtiment, l'aéraulique du bâtiment, l'éclairage dans le bâtiment, la pollution produite par un bâtiment et les puits de lumière canadienne à l'intérieur d'un bâtiment, pour ne citer que cela. Dans ce qui suit, nous ne développerons que la partie en lien avec l'éclairement naturel intérieur. J'ai ainsi pu participer à de nombreuses publications et projets de recherche qui ont permis d'améliorer l'outil.

3.2 Contexte et problématique scientifique

De nos jours, optimiser la consommation énergétique d'un bâtiment tout en respectant le confort humain et l'environnement (intérieur et extérieur) devient nécessaire. Aussi, de nombreux outils et techniques sont conçus de par le monde afin de répondre à ce besoin. Cela passe par la prise en compte de la conception architecturale de l'habitat, des systèmes de production énergétique installés, voire des matériaux de construction utilisés. Aussi variées que soient les possibilités de simulations et d'analyses pour répondre à ces besoins, nous nous focaliserons essentiellement sur les facteurs qui influencent la consommation électrique d'un bâtiment. Ceci nous ramène à l'étude de l'éclairage, qui peut représenter environ 1/3 de la consommation électrique d'un bâtiment [Wag+20].

La Région Réunion a financé de nombreux projets, sur une consultation large, afin d'accompagner toute réflexion sur l'avenir énergétique de l'île. Il s'avère que l'éclairage est l'une des nombreuses préoccupations énergétiques et économiques de l'île. En effet, des outils d'aide à la décision pour l'optimisation énergétique dans le bâtiment à la Réunion (région insulaire tropicale et humide) devraient être développés afin de trouver des solutions adaptées au problème majeur de la consommation énergétique de cet environnement particulier [F01]. A cela s'ajoute le souci d'un confort visuel intérieur dans une région où les éblouissements intérieurs sont courants à cause d'une durée d'ensoleillement, sur l'année, très longue.

Sur le plan scientifique, la problématique de notre étude repose essentiellement sur trois points (voir [E13]] :

- L'absence totale d'informations concernant le gisement solaire lumineux dans notre région insulaire (zone océan Indien) qui est un handicap pour l'optimisation de l'éclairage intérieur et de l'étude du confort visuel ;
- Le manque d'outils (experts) de simulation en éclairagisme fiables et adaptés à nos régions. En effet, parmi les outils (numériques) existants, peu d'entre eux ont réellement fait l'objet d'une validation scientifique en lien avec des données locales ;
- Et enfin, des modèles d'éclairement naturel non adaptés dans les régions tropicales humides. Citons l'exemple des modèles empiriques d'éclairement lumineux extérieur, basés sur l'efficacité lumineuse, mis en place par des chercheurs dans de nombreux pays et dont l'application se limite uniquement à ces localités. Il nous a donc fallu améliorer ces modèles ou en trouver d'autres plus performants.

Caractériser l'éclairement lumineux naturel intérieur d'un local est très complexe car plusieurs paramètres structurels et fonctionnels entrent en jeu (facteur de forme, taille des ouvertures, profondeur des locaux, gisement énergétique, etc.). Il existe, en général, trois familles de modèles d'éclairement naturel intérieur : les modèles dits simplifiés, les modèles numériques et, enfin, les modèles dits expérimentaux (voir [A04]).

Les modèles expérimentaux (voir [Maa+05] demandent beaucoup de moyens financiers (reconstitution de la voûte céleste artificielle dans le cas d'étude d'éclairement naturel intérieur à partir d'une maquette réduite, par exemple) et une parfaite maîtrise des maquettes à échelle réduite ou de l'expérimentation in situ. Dans le cas expérimental, la période pour retrouver des valeurs exploitables est relativement longue et dépend fortement des contraintes climatiques du lieu. S'agissant des maquettes réduites, on augmente considérablement les erreurs sur les résultats obtenus lorsque l'on cherche à mettre en place un modèle à partir de cette méthode. J'ai renoncé à ces démarches.

Concernant les modèles numériques [A03], leur temps de calcul numérique est élevé. Un autre inconvénient de ces modèles est que ce sont des modèles beaucoup plus utilisés dans l'étude qualitative (rendu réaliste en 3D) et donc peu adaptés à notre étude plutôt quantitative de la variable lumineuse que nous cherchons à caractériser.

Et enfin, pour ce qui est des modèles simplifiés (voir [MFA06]), l'inconvénient majeur est qu'ils ne sont applicables que sous certaines conditions (type de ciel, limité à quelques positions ou points uniquement, etc.). Toutefois, ils présentent énormément d'avantages : faciles à comprendre et à mettre en place, calculs plus rapides et simples, résultats acceptables, etc. De tels modèles s'inscrivent dans la logique même du logiciel existant au sein de notre laboratoire et dénommé CODYRUN : convivialité, simplicité, temps de simulation très courts, etc.

C'est donc naturellement que nous nous sommes orientés vers une amélioration des modèles dits simplifiés d'éclairement naturel (intérieur et extérieur) par une approche systémique. Nous verrons en détail le formalisme de ces deux modèles dans le paragraphe qui suit.

3.3 Outils et méthodologie développés

Deux modèles ont été développés et implémentés dans le logiciel CODYRUN durant ce travail. Un code permettant de simuler ces modèles dans le logiciel CODYRUN a également été mis en place pour permettre à l'outil de calcul de simuler le phénomène en un point quelconque de l'ambiance intérieure. Les deux modèles intégrés dans le logiciel sont les suivants :

- Le nouveau modèle simplifié de calcul d'éclairement naturel intérieur (voir [A03] que nous proposons est basé d'abord sur la connaissance et la sélection judicieuse des modèles existants dans le domaine, puis sur le couplage de ces derniers entre eux afin de rendre le modèle applicable quelles que soient les conditions limites ou aux frontières. Dans un premier temps, nous déterminons la partie diffuse de l'éclairement en utilisant la formule du Facteur de Lumière du Jour (FLJ). Ce coefficient prend en compte à la fois l'éclairement diffus provenant du ciel, du milieu extérieur où se situe le bâtiment, mais également de la lumière provenant de la réflexion sur les parois internes de notre système bâti. La partie directe provenant du soleil sera calculée à partir de la connaissance du direct incident (donné par un fichier météorologique ou simulé) que l'on multipliera par le coefficient de transmission de l'ouverture. L'éclairement global en un point intérieur sera donné, bien entendu, par la somme des deux. Afin de mieux appréhender le phénomène photométrique, un modèle simplifié, combiné aux calculs décrits précédemment, tenant compte de la tâche solaire intérieure d'un plan utile ou encore de la prise en compte du direct provenant d'un second jour (éclairement provenant d'une source secondaire), sera rajouté au modèle final que nous proposons. L'originalité de ce travail repose sur le fait que nous avons combiné des modèles simplifiés de différentes natures et avons rendu les calculs d'éclairement, en tout point d'un plan utile, possibles et, ceci, quelles que soient les conditions d'application. Cela a ainsi permis de ne pas restreindre leurs domaines d'application respectifs et ainsi d'avoir des valeurs d'éclairement, simulées à partir du modèle mis en place, quelle que soit la limite d'utilisation (types de ciel, positions des points de calculs, etc.). Ce modèle est décrit dans l'équation 3.1.

$$E_{glo,P} = \left(FLJ_P \times E_{P,ext}\right) + \left(E_{Dir,S} \times \rho_{sol} \times \frac{N_{TS}}{N_G}\right) + \left(E_{Dir,S} \times \tau_{vitre}\right) \tag{3.1}$$

avec :

$E_{glo,P}$: Éclairement lumineux global au point P (en lux) ;
FLJ_P : Facteur de Lumière du Jour au point P (en %) ;
$E_{P,ext}$: Éclairement lumineux horizontal extérieur au point P (en lux) ;
$E_{Dir,S}$: Éclairement lumineux direct provenant du soleil (en lux) ;
ρ_{sol} : Coefficient de réflexion au sol (en %) ;
N_{TS} : Nombre de noeuds (ou points) éclairés directement par le soleil dans la grille surfacique du plan utile (adimensionnel) ;
N_G : Nombre total de points de la grille surfacique du plan utile (adimensionnel) ;
τ_{vitre} : Coefficient de transmission de l'ouverture (égal à 1 si pas de vitrage. En %).

- S'agissant du modèle de gisement solaire lumineux extérieur spécifique à l'île de la Réunion, nous nous sommes orientés vers la connaissance de l'efficacité lumineuse extérieure de l'île par une approche systémique et empirique de la variable (voir [B02]). En effet, nous avons constaté que la plupart des bases de données météorologiques disponibles sur l'île mesuraient l'irradiation (gisement solaire énergétique), mais pas le gisement solaire lumineux. Afin de reconstituer ce gisement solaire lumineux, nous avons déterminé l'efficacité lumineuse de la région. Pour ce faire, nous avons mené une campagne de mesure simultanée du gisement solaire lumineux (en $Cd.m^{-2}$) et de son potentiel énergétique (gisement solaire énergétique en $W.m^{-2}$) durant une période assez longue (environ une année de données). Cette base de données a ensuite permis d'établir cette constante d'efficacité lumineuse, qui est la moyenne du rapport entre ces deux gisements (photométrique et énergétique) en $lm.W^{-1}$. Deux constantes d'efficacité lumineuse ont été proposées, dans ce travail, spécifique à l'île de la Réunion : une constante d'efficacité lumineuse globale égale à 121.5 +/- 7.5 $lm.W^{-1}$ et une constante d'efficacité lumineuse diffuse égale 140 +/- 40 $lm.W^{-1}$, et ce, quel que soit le type de ciel considéré (couvert, clair ou intermédiaire). Ces deux valeurs d'efficacité lumineuse nous permettent, à partir de la connaissance du gisement solaire énergétique, de retrouver celle du gisement solaire lumineux durant les années précédentes et donc de reconstituer artificiellement les données météorologiques de ce gisement solaire lumineux.De même qu'en absence de connaissance sur le gisement solaire lumineux, nous pouvons reconstituer ces valeurs à partir de ces constantes d'efficacité lumineuse et des données sur l'irradiation (gisement solaire énergétique).

3.4 Résultats des travaux scientifiques réalisés

Notre laboratoire dispose d'un outil qui traite de la simulation thermo – aéraulique dans le bâtiment. Ce logiciel, appelé CODYRUN (programmé en langage C), a servi de référence dans la mise en place de règles expertes et de labels tels que ECODOM (qui sert de support pour la réglementation thermique dans les DOM) ou encore l'outil PERENE. Notre but a été de l'améliorer en y introduisant des modèles de simulation d'éclairage (artificiel et naturel) intérieur et extérieur. Cela a permis de diversifier les champs d'application du logiciel. La Figure 3.1 illustre l'ensemble des modifications apportées à CODYRUN afin que ce dernier puisse tenir compte de la simulation 3D de l'éclairement et éclairage (intérieur et extérieur) en tenant compte des modèles développés lors de ce travail.

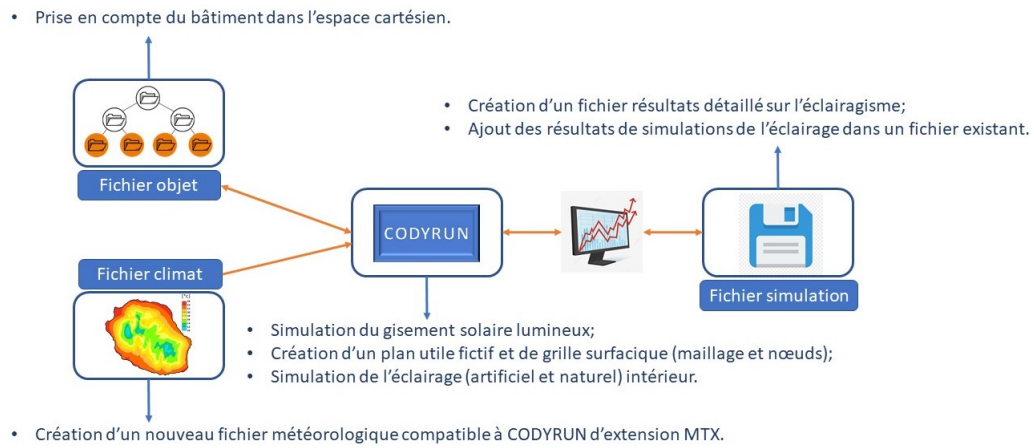

Fig. 3.1.: Les contributions apportées au logiciel CODYRUN

L'algorithme du code de calcul d'éclairement naturel et artificiel intérieur utilisé dans l'environnement informatique du logiciel CODYRUN est donné par la Figure 3.2.

La validation des logiciels de simulation numérique sur des bâtiments est un sujet tout aussi important que leur développement. La fiabilité de ces outils doit être prouvée pour s'assurer de la qualité des résultats obtenus par les modèles de description (voir [MFA06], [C06], [C07] et [C09]).

Le même objectif de crédibilité doit être manifesté pour valider les logiciels de simulation en éclairage. Nous avons donc procédé à une série de tests sur CODYRUN afin de prouver son habilitation à simuler correctement l'éclairage (naturel et artificiel) intérieur.

Trois catégories de tests ont été réalisées. Il s'agit de différents tests sur des éléments de validation de types :

- Tests analytiques : tâche TC-3-33 du C.I.E. ;
- Tests comparatifs : cas test du C.S.T.B et tâche TC-3-33 du C.I.E. ;

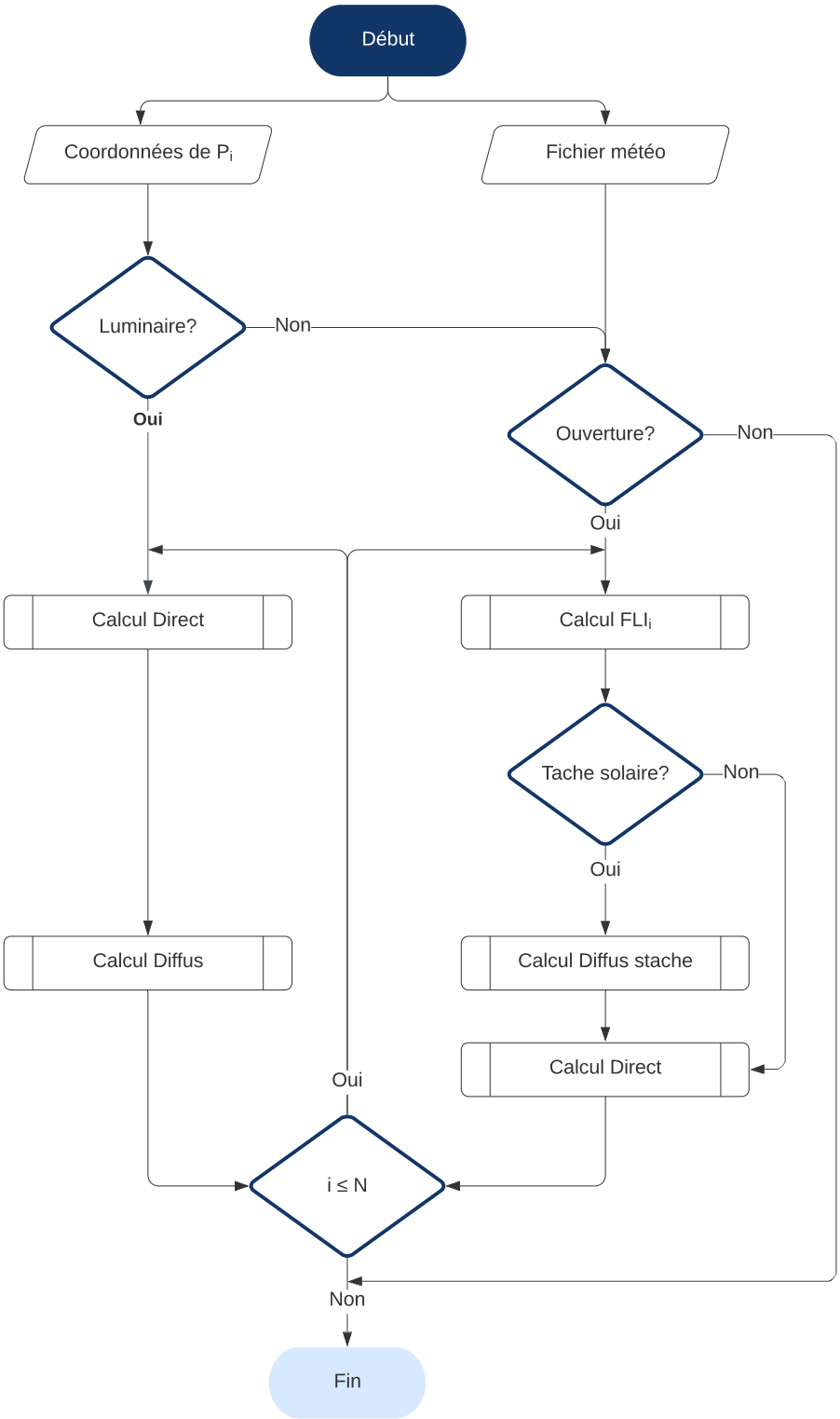

Fig. 3.2.: Algorithme de calcul du code d'éclairage/éclairement intérieur utilisé dans CODYRUN

- Tests expérimentaux : tâche TC-3-33 du C.I.E, cas test de l'E.P.F.L, cas test du CIBSE et tâche 21 de l'I.E.A.

Durant cette étude, nous avons également mis en place des cas tests analytiques (compléments des tests du CIE) et un cas test expérimental (étude en régime dynamique sur la cellule LGI) pour la validation de l'éclairement naturel intérieur.

Le tableau 3.1 récapitule ces éléments de validation et les résultats d'erreurs obtenus (voir [E13]).

Type de test	Lumière	Cas test	Erreur relative (%)	Fiabilité (%)	Etat du test
Analytique	Naturel	II.10	3.87	91.44	Ouverture latérale
	Naturel	II.11	4.54	93.65	Différents Types de ciels CIE
	Naturel	II.14.4	1.96	98.04	Diffus (facteur de forme)
	Naturel	II.14.9	15.61	84.34	Gisement solaire
	Artificiel	II.1	0.25	99	Source ponctuelle
	Artificiel	II.2	2.33	86	Source surfacique
	Artificiel	II.7	1.39	95	Facteur de réflexion
	Artificiel	Complément	0.55	89	Multi-source
Comparatif	Naturel	CSTB	5.92	95	FLJ
	Artificiel	TC-3-33	3.18	90	Source surfacique
	Naturel	III.2.5	3.38	93.49	Ciel artificiel
Expérimental	Naturel	(IEA)	9.31	74.46	Modèle réduit EPFL
	Naturel	(IEA)	11.31	70.92	Modèle réel HUT
	Naturel	Cellule LGI	32	88.95	Régime dynamique
	Artificiel	Scénario 1	6.1	69.38	TC-3-33
	Artificiel	Scénario 3	1.57	60.53	TC-3-33
		Minimum =	**0.01**	**60.53**	
		Maximum =	**32**	**98.04**	
		Moyenne =	**7.81**	**86.59**	

Tab. 3.1.: Récapitulatif : degré de fiabilité du logiciel CODYRUN à simuler l'éclairement naturel et l'éclairage artificiel

Dans l'ensemble, les résultats obtenus sont encourageants. En effet, ils ont pu démontrer que tous les codes introduits dans le logiciel répondent aux objectifs que nous nous sommes fixés.

La Figure 3.3 donne un aperçu d'un des cas tests de comparaison entre une expérience menée au sein du laboratoire sur un bâtiment à échelle réelle et la simulation d'éclairement naturel intérieur à partir du logiciel CODYRUN.

Plusieurs modifications du logiciel CODYRUN ont été indispensables afin de pouvoir simuler l'éclairement intérieur (voir [C02], [B05] et [B06]) : le fichier météorologique du logiciel (d'extension MTO) a été modifié (ajout d'une colonne d'éclairement lumineux dans la base de données du fichier devenu MTX au lieu de MTO) ; nous avons également modifié le code source pour permettre des simulations en 3D (espace cartésien de coordonnées x, y et z). Pour ce qui est de l'environnement de simulation, un nouveau code

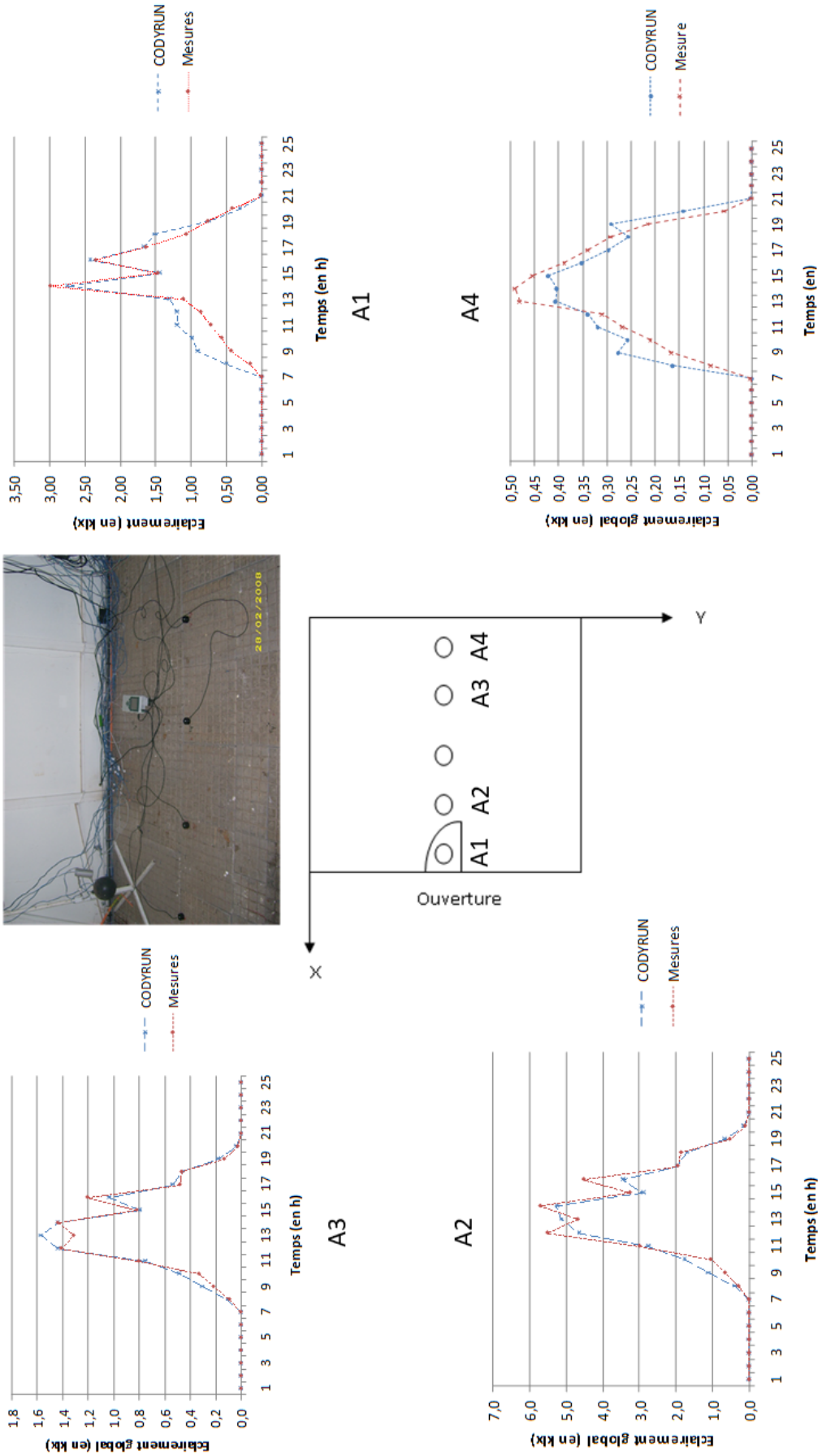

Fig. 3.3.: Comparaison éclairement naturel : mesures vs logiciel CODYRUN

pouvant créer un plan utile et des mailllages sur ce plan a été mis en place. Concernant les résultats de simulation, un fichier regroupant les informations liées à la simulation de l'éclairage aussi bien artificiel que naturel a été créé. Le pas de temps, le type d'éclairement (diffus, global, direct), les valeurs obtenues dans chacun des noeuds du maillage ainsi que les conditions météorologiques sont pris en compte dans ce fichier.

3.5 Publications, projets/financements et brevet associés au sujet 1

- Ouvrages et chapitres d'ouvrages (2) :
  1. [*A*04] : **Fakra A. H.**, Boyer H., Lafosse Eddy. The new method to determinate indoor dayligthing the building : improving Lumen models. Vol I – Vol. V, Septembre 2007 ; Ed. By Springer Berlin Heidelberg ; ISBN : 978-3-540-75996-6.
  2. [*A*03] : **Ali Hamada FAKRA**, intégration de modèles d'éclairage à un code de calcul en bâtiment ; 205 pages. Livre édité à ''Editions Universitaires Européennes" le 14 octobre 2017. ISBN 978-3-659-55842-9.
- Revues spécialisées avec comité de lecture (4) :
  1. [*B*02] : **A. H. Fakra**, H. Boyer, F. Miranville, D. Bigot. A simple evaluation of global and diffuse Luminous efficacy for all sky conditions in tropical and humid climate. Renewable Energy, Elsevier, January 2011, 36 : 298-306.
  2. [*B*03] : **A. H. Fakra**, F. Miranville, H. Boyer, S. Guichard. Development of a simple model to predict indoor daylighting : integration in CODYRUN software and validation. Energy Conversion and Management, Elsevier, July 2011, 52 : 2724 – 2734.
  3. [*B*05] : H. Boyer, **A. H. Fakra**, F. Miranville, B. Malet-Damour, S. Guichard, P. Lauret, Evolution of CODYRUN from thermal simulation to coupled thermal and daylight simulation software, Energy Procedia, Elsevier, 2014, 57 : 1916 – 1968.
  4. [*B*06] : B. Malet-Damour, H. Boyer, **A. H Fakra**, M. Bojic, Light pipes performance prediction : inter model and experimental confrontation on vertical circular light-guides, Energy Procedia, Elsevier, 2014, 57 : 1977 – 1986.
- Congrès/Colloques avec actes publiés (6) :
  1. [*C*02] : **Fakra A. H.** ; Boyer H. Intégration d'un modèle d'éclairement naturel dans le logiciel CODYRUN. Colloque Equilibres environnementaux, énergie renouvelables et développements urbains. Revue angliciste de La Réunion ; N°29 – II. Mars ; 2007. Saint-Denis ; Réunion – France.

2. [*C*06] : **Fakra A. H.** ; Boyer H. ; Maamari F. Experimental validation for software DIALUX : application in CIE test cases for building daylighting simulation. COBEE (First International Conference on Building Energy and Environment), Aout ;2008. Dalian, Chine.
3. [*C*07] : **Fakra A. H.** ; Miranville F. ; Bigot D. ; Boyer H. Element of validation of artificial lighting through the software CODYRUN : application to a test case of CIE. IASTED Power and Energy System, September,2010. Gaborone, Botwana. p. 228-232.
4. [*C*09] : Moosafeer M. ; **Fakra A. H.** ; Boyer H. ; Miranville F. ; Experimental validation of numerical simulation in thermal building using the software CODYRUN. International Smart Energy Networks of Cooperation for Substainable Development ; Novi Sad ; Serbia ; July 4 – 7, 2011. ECOS 2011.
5. [*C*10] : **Fakra A. H.** ; Moosafeer M. ; Boyer H. ; Miranville F. ; Numerical simulation of daylighting using the software CODYRUN. International Scientific Conference CISBAT 2011 ; Lausanne, Switzerland, September 14-16.
6. [*C*11] : P. Jean A. ; **Fakra A. H.** ; Boyer H. ; Miranville F. ; CODYRUN : artificial lighting simulation software for visual comfort and energy saving optimization. International Scientific Conference CISBAT 2011 ; Lausanne, Switzerland, September 14-16.

- Thèse (1) :
  1. [*E*13] : **Fakra, A. H.** Intégration de modèles d'éclairage à un code de calcul physique du bâtiment : modélisation, validation et applications. Thèse soutenue le 15 juin 2009, Option : Physique du bâtiment. Université de la Réunion, 2009, 189 p.
- Autres : documents internes, fascicules, rapports, etc.(2) :
  1. [*E*05] : **Fakra A. H.**, Mise en place d'un protocole expérimental in situ et instrumentation pour l'étude du gisement solaire lumineux (éclairement extérieur) à la Réunion. Laboratoire L.P.B.S. Université de La Réunion. Île de la Réunion, janvier, 2008.
  2. [*E*06] : **Fakra A. H.**, Etude d'éclairement lumineux intérieur à la Réunion : expérimentation, instrumentation et mise en place d'une base de données de référence en régime dynamique sur la cellule test (in situ) LGI. Laboratoire L.P.B.S. Université de la Réunion. Île de la Réunion, février, 2008.
- Projet/Financements (1) :
  1. [*F*01] : Projet Région Réunion : F. Miranville (porteur du projet), H. Boyer, J. Sériacaroupin, **A. H. Fakra**, D. Calogine. Compléments d'instrumentation d'une cellule d'essais en environnement réel utilisée comme support de recherche pour la maitrise de l'énergie et le confort dans les bâtiments. Convention Conseil Régional de La Réunion / Université de La Réunion. Programme de recherche annuel 2007. Laboratoire L.P.B.S. Ile de La Réunion. Octobre 2007. Financement accordé en 2008 : 24 000 € (achevé en 2012).

Sélection synthétique de la bibliographie sur le sujet 1 : logiciel CODYRUN

[Ade+98] L. ADELARD, F. PIGNOLET-TARDAN, T. MARA et al. „Sky temperature modelisation and applications in building simulation“. In : *Renewable Energy* 15.1-4 (sept. 1998), p. 418-430 (cf. p. 10).

[Boy+96] H. BOYER, J.P. CHABRIAT, B. GRONDIN-PEREZ, C. TOURRAND et J. BRAU. „Thermal building simulation and computer generation of nodal models“. In : *Building and Environment* 31.3 (mai 1996), p. 207-214 (cf. p. 10).

[Boy+98] H. BOYER, F. GARDE, J.C. GATINA et J. BRAU. „A multimodel approach to building thermal simulation for design and research purposes“. In : *Energy and Buildings* 28.1 (août 1998), p. 71-78 (cf. p. 10).

[Boy+99] H. BOYER, A.P. LAURET, L. ADELARD et T.A. MARA. „Building ventilation : a pressure airflow model computer generation and elements of validation“. In : *Energy and Buildings* 29.3 (jan. 1999), p. 283-292 (cf. p. 10).

[GB+02] F GARDE-BENTALEB, F MIRANVILLE, H BOYER et P DEPECKER. „Bringing scientific knowledge from research to the professional fields : the case of the thermal and airflow design of buildings in tropical climates“. In : *Energy and Buildings* 34.5 (juin 2002), p. 511-521 (cf. p. 10).

[Luc+02] Franck LUCAS, Laetitia ADELARD, François GARDE et Harry BOYER. „Study of moisture in buildings for hot humid climates“. In : *Energy and Buildings* 34.4 (mai 2002), p. 345-355 (cf. p. 10).

[Maa+05] F. MAAMARI, M. FONTOYNONT, A. TSANGRASSOULIS et al. „Reliable datasets for lighting programs validation—benchmark results“. In : *Solar Energy* 79.2 (août 2005), p. 213-215 (cf. p. 11).

[MFA06] F. MAAMARI, M. FONTOYNONT et N. ADRA. „Application of the CIE test cases to assess the accuracy of lighting computer programs“. In : *Energy and Buildings* 38.7 (juil. 2006), p. 869-877 (cf. p. 11, 14).

[Wag+20] Khairul Rijal WAGIMAN, Mohd Noor ABDULLAH, Mohammad Yusri HASSAN et al. „Lighting system control techniques in commercial buildings : Current trends and future directions“. In : *Journal of Building Engineering* 31 (sept. 2020), p. 101342 (cf. p. 10).

4

Modélisation 1D d'un gazogène à lit fixe et développement d'un outil de dimensionnement et d'optimisation de forme du système énergétique

Dans ce sous-chapitre, nous aborderons la modélisation systémique d'un système de production d'électricité propre qui valorise les déchets solides en milieu tropical humide insulaire. Le sujet entre à la fois dans les thématiques de l'énergétique et de l'environnement.

Table des matières du chapitre 4

4.1 Historique du logiciel SIZER 24

4.2 Contexte et problématique scientifique 24

4.3 Outils et méthodologie développés 27

4.4 Résultats des travaux scientifiques réalisés 28

4.5 Publications, projets/financements et brevet associés au sujet 2 36

Sélection synthétique de la bibliographie sur le sujet 2 : logiciel SIZER **39**

4.1 Historique du logiciel SIZER

Ce projet a démarré en 2017 avec un étudiant en licence Document1. L'objectif initial était de concevoir un outil d'aide à la décision simple d'utilisation, robuste et prenant en compte tous les paramètres influençant un mini-gazogène dédié à la production d'électricité à partir d'une biomasse quelconque. L'idée a été de nous intéresser aux types de production d'énergie en zones insulaires dites isolées dont la connexion au réseau électrique est difficile. Derrière cette idée, nous avons tenu à nous orienter vers des sources d'énergie propre capables de valoriser les déchets produits dans ces zones un peu particulières car éloignées des grandes villes et peu peuplées. A la fin du stage de recherche, l'étudiant pose les premiers socles d'un code de calcul constitué de nombreuses équations régies par des variables d'entrées, de sorties et de paramètres structurels et fonctionnels. En 2019, un stagiaire ingénieur (voir Document2) améliore l'outil en proposant un calcul permettant de réaliser de l'optimisation de forme du système gazogène. L'étudiant arrive à prouver l'importance de cette optimisation dans le rendement global du système de production en question. Les équations de départ de l'outil sont alors revues à la hausse et modifiées pour être adaptées au nouveau paradigme de modélisation globale du système gazogène. Actuellement, l'outil est en cours de validation par comparaison avec des données expérimentales provenant de deux dispositifs à petite [F04] et moyenne échelles (voir [F07] et [F06]). De nos jours, l'outil est en mesure de simuler les dimensions optimisées d'un mini-gazogène à lit fixe, de donner la quantité d'air nécessaire à la gazéification, de fournir la quantité de gaz toxique rejetée dans l'environnement par le système énergétique, d'informer sur la quantité de biocarburant produite en fonction de la quantité et qualité des déchets disponibles, mais aussi de quantifier la cendre produite en fonction de cette même biomasse. Nous verrons, dans le sous-chapitre 2.3, comment cette approche de modélisation systémique est mise en oeuvre.

4.2 Contexte et problématique scientifique

La problématique des déchets produits par l'homme et l'impact négatif que cela entraîne sur l'environnement n'est plus à démontrer. De nombreuses pistes de recherche dans le domaine sont proposées pour résoudre le problème du dérèglement climatique et donc de la préservation de l'environnement. Parmi elle figure le concept de revalorisation et/ou transformation de ces déchets dans le but de les dépolluer et les réutiliser. L'objectif étant non seulement d'atténuer l'impact carbone sur l'environnement, mais également de trouver une issue profitable à l'humanité à propos de ces déchets qui ne cessent de s'accroître au fil des années. Sur le plan scientifique, des dispositifs existent pour produire de l'énergie dite propre à partir de ces déchets. Nous avons notamment l'exemple des systèmes dits de pyrogazéïfication qui permettent de produire de l'électricité à partir

d'ordures ménagères assimilées. Ces dispositifs ont des avantages et des inconvénients et doivent être donc améliorés afin d'atteindre réellement le double objectif qui est de réduire le taux de pollution dans l'air et de répondre aux besoins énergétiques d'une population. En particulier pour des zones insulaires, cette problématique devient de plus en plus alarmante de par la montée rapide des eaux due au dérèglement climatique causé par cette pollution et à la quantité de déchets qui s'accumulent au fil du temps, causant ainsi la réduction des surfaces habitables des territoires insulaires, en particulier des petites îles. Ces remarques nous incitent à réfléchir à des outils d'aide à la décision permettant d'anticiper cette pollution et d'apporter des solutions techniques pour réduire l'impact d'un tel système de production énergétique sur l'environnement. D'une part cela permet d'apporter une solution à la valorisation des déchets qui ne cessent de s'accroître au fil du temps, d'autre part de pouvoir répondre aux besoins énergétiques mondiaux qui ne cessent d'augmenter d'année en année. Dans ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement aux gazogènes à lit fixe dédiés à la production d'électricité à partir de déchets (biomasse) dans des zones rurales non connectées, car ce sont des systèmes simples à mettre en place et qui répondent parfaitement aux attentes des régions insulaires dont les besoins énergétiques sont très différents de ceux des pays continentaux de par leur superficie et les densités de leur population, leur isolement géographique et les conséquences désastreuses de la pollution issue des déchets solides dans des écosystèmes fragiles.

Un système de gazéification dédié à la production d'électricité, à petite échelle (moins de 200 kW) à partir de déchets, est constitué généralement d'un souffleur (permettant de maintenir la combustion), d'un brûleur (compartiment où se déroulera la combustion de la biomasse), d'un cyclone (permettant de refroidir et de filtrer les particules du gaz de synthèse produit)et d'un moteur thermique qui sera alimenté par le gaz refroidi constituant le carburant. Ces composantes sont reliées entre elles par des tuyaux de canalisation hydraulique thermiquement isolés. L'ensemble du dispositif est illustré sur la Figure 4.1.

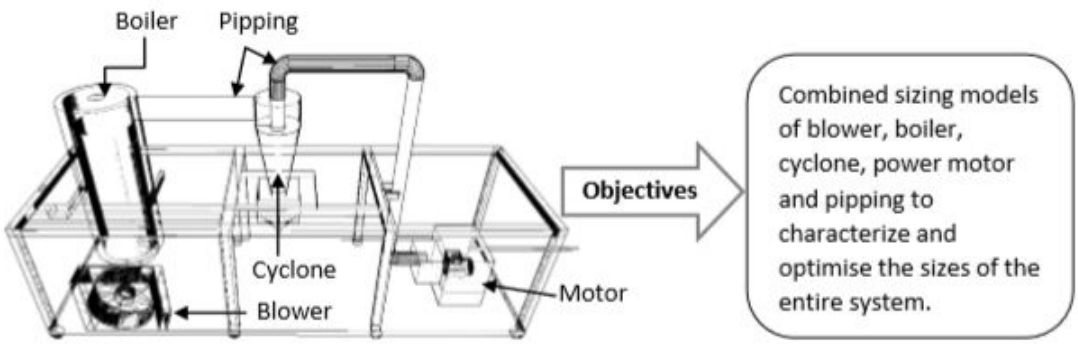

Fig. 4.1.: Composante d'un mini-gazogène et objectif de l'étude

Sur le plan de la modélisation d'un tel système, de nombreuses études ont été réalisées pour décrire le fonctionnement de chaque partie du système (voir [MPACc],[LWHl],[F.Cn] and [JLb]). On a notamment Garcia et al. [RGBc] qui ont étudié l'optimisation d'une chaudière à biomasse domestique de 120 kW. Le combustible d'alimentation et l'entrée d'air ont été modifiés manuellement. Une surveillance des émissions gazeuses et des déchets solides a été réalisée. Centeno et al. [F.Cn] ont, quant à eux, développé un modèle mathématique pour prédire la performance en régime permanent d'un système d'alimentation d'un gazéifieur à tirage descendant et d'un moteur à allumage par étincelle basé sur la biomasse. Cependant, aucun outil ne combine tous les modèles mathématiques retrouvés dans la littérature pour optimiser la taille de l'ensemble du système de gazéification. Cela signifie qu'aucun de ces modèles n'est en mesure de simuler simultanément les dimensions optimales de la chaudière, de la soufflerie, des raccordements (tuyauteries), du cyclone et du moteur pour générer une puissance maximale et un rendement énergétique optimal.

S'agissant des outils numériques, Gicquel [R.G12] a développé l'outil de simulation ThermOptim qui fournit un environnement de modélisation systémique pour les technologies énergétiques. L'outil intègre un éditeur de schémas inter-connectés, des diagrammes interactifs, des fonctions de simulation et une méthode d'optimisation. De même, selon les travaux de Wang et Stiegel [TG17] et de Balu et Chung [E.Br], Gaseq a été développé et a permis d'effectuer des calculs d'équilibre de combustion. Les limites des outils existants concernent l'optimisation des caractéristiques de la biomasse. Nous savons également que ces logiciels sont limités dans l'optimisation de la qualité et de la quantité des déchets (biomasse) nécessaires ou du gaz de synthèse produit pendant le processus. C'est pourquoi d'autres laboratoires ont développé des logiciels qui simulent la taille optimale d'un seul sous-système du système de gazéification lui-même, mais pas du système entier. On peut citer le travail de Lan [W.Ll] qui calcule la taille de la chaudière et le travail d'Altmeyer et Mathieu [al.r] pour simuler uniquement la taille optimale du cyclone par exemple.

Nous constatons que ces études ont abouti à la mise en place de nombreux modèles (1D, 2D voir même 3D) du brûleur, du cyclone et du moteur thermique associé à un alternateur qui produit de l'électricité séparément. Rares sont les modèles qui proposent d'optimiser le dispositif dans son ensemble. De plus, ces outils ne permettent pas de connaître réellement les impacts environnementaux d'un tel dispositif (quantité de cendre et de gaz toxique produits par le dispositif en fonctionnement).

L'objet de ce travail a donc été de mettre en place un outil d'aide à la décision spécialisé dans l'optimisation d'un mini gazogène à lit fixe ainsi que dans la fourniture d'informations relatives à la quantité de polluant (solide ou/et gazeux) produit par le système en question.

La plupart du temps, les chercheurs spécialistes du domaine préfèrent utiliser les codes numériques de l'environnement tels que EES [ACgu], TRNSYS, ASPEN+ ou Matlab. Le logiciel SIZER (voir [C17] et [C18]) que nous présenterons par la suite est développé en environnement numérique EES (Engineering Equation Solver) qui est un solveur d'équation capable de modéliser un gazogène à tirage descendant en régime permanent et sans pyrolyse externe.

4.3 Outils et méthodologie développés

L'approche utilisée pour caractériser tous les aspects fonctionnels qui tiennent compte du système dans son ensemble est décrite dans cette section. Le problème est traité de façon macroscopique (c'est-à-dire que nous ne considérons pas les phénomènes physiques et/ou chimiques microscopiques qui se produisent dans le système). Le nouveau modèle développé fonctionne en régime statique (voir Figure 4.2). Ce modèle systémique a été implémenté dans le logiciel SIZER (Software modellIng siZe of the gasifier) du laboratoire PIMENT.

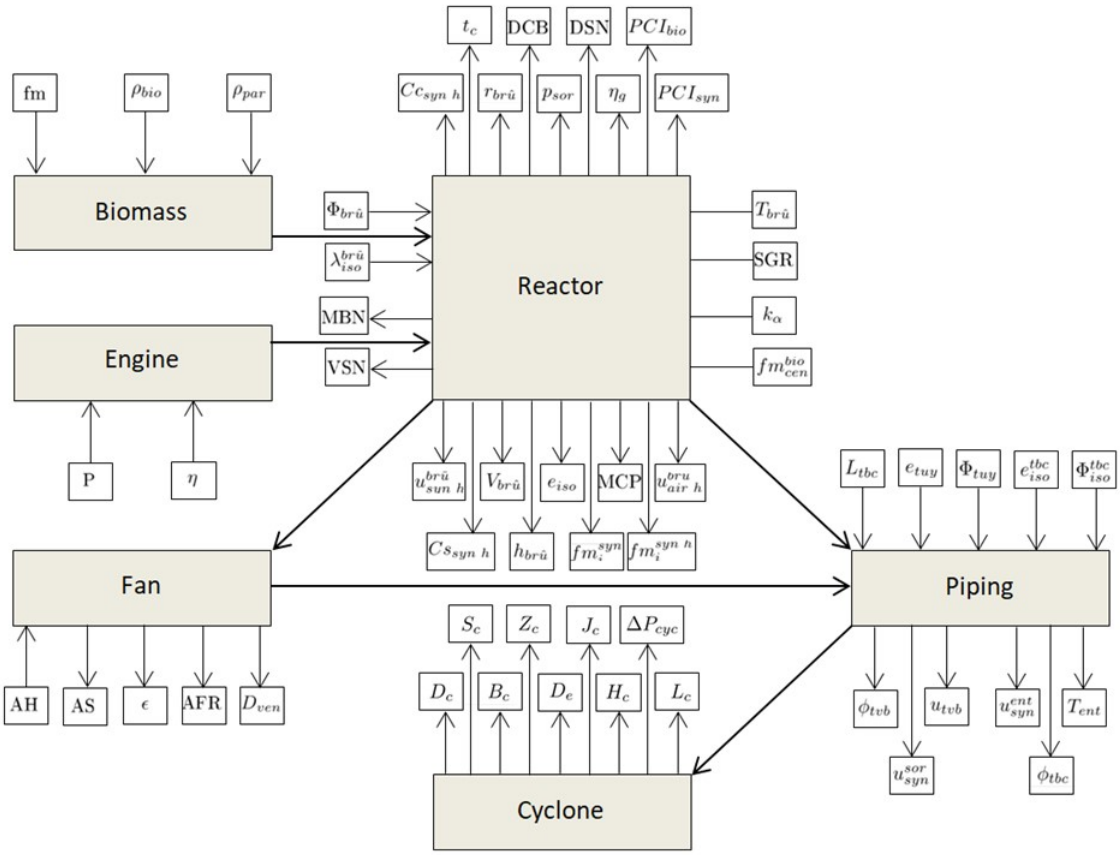

Fig. 4.2.: Modélisation systémique du mini gazogène implémenté dans SIZER

L'idée générale établie par ce système d'analyse n'est applicable qu'à un gazogène à lit fixe. Chaque sous-système est représenté par un modèle de bloc avec des variables

physiques d'entrées/sorties (E/S) et des paramètres. Tous les blocs sont inter-connectés via les variables et les paramètres physiques d'E/S. Ces derniers permettent au modèle de chaque sous-système de simuler simultanément leurs tailles respectives et de proposer un volume optimal de l'ensemble du système en tenant compte des tailles des tuyauteries, du brûleur et du cyclone dans les calculs. Une fois que la technologie du système de gazéification a été définie, la seule information dont le protocole a besoin pour prévoir la taille du système est soit le débit de biomasse disponible (combustible) en $kg.h^{-1}$ soit les besoins en électricité (puissance consommée en kW).

Au final, treize variables d'entrées , trente-neuf variables de sorties, quatre paramètres du système et soixante-dix-sept fonctions qui les lient ont été établis. Le nombre élevé de variables d'entrées, de sorties et de paramètres ainsi que de fonctions nous incite à travailler dans un environnement informatique dédié. C'est la raison pour laquelle le solveur d'équation EES a été choisi. L'interface graphique de SIZER a donc été réalisée sur cet environnement informatique. Le Tableau 4.1 indique les variables d'entrées, de sorties ainsi que les paramètres de la Figure 4.2.

Entrées, sorties et paramètres tuyauterie (brûleur-cyclone)			
Nom	**Type**	**Symbole**	**Unité**
Longueur	Entrée	L_{tbc}	cm
Epaisseur paroi tube	Entrée	e_{tuy}	cm
Conductivité thermique tube	Entrée	Φ_{tuy}	W/mK
Epaisseur isolant tube	Entrée	e_{iso}^{tbc}	cm
Conductivité thermique isolant	Entrée	Φ_{iso}^{tbc}	W/mK
Diamètre	Sortie	ϕ_{tbc}	cm
Débit de syngaz sortant du brûleur	Sortie	u_{syn}^{sor}	m/s
Débit du syngaz entrant dans cyclone	Sortie	u_{syn}^{ent}	m/s
Température du syngaz dans cyclone	Sortie	T_{ent}	$\circ C$

Le Tableau 4.2 illustre quelques-unes des soixante-dix-sept équations utilisées lors de la démarche systémique.

4.4 Résultats des travaux scientifiques réalisés

Ces travaux ont mené à la création d'une interface graphique sous EES (voir Figure 4.3). Des tests de fiabilité (ou éléments de validation) sur le logiciel SIZER ont également été réalisés. Ces tests ont porté sur la capacité du logiciel à simuler correctement la

Entrées, sorties et paramètres de la biomasse			
Nom	**Type**	**Symbole**	**Unité**
Composition (fraction massique)	Entrée	fm	$kg.kg^{-1}$
Masse volumique	Entrée	ρ_{bio}	$kg.m^{-3}$
Densité apparente	Entrée	ρ_{par}	$kg.m^{-3}$

Entrées, sorties et paramètres du soufleur			
Nom	**Type**	**Symbole**	**Unité**
Humidité absolue de l'air	Entrée	AH	g/Nm^3
Air stochiométrique	Sortie	AS	l/kg
Ratio équivalent	Sortie	ϵ	Nm^3/Nm^3
Ratio Air/Carburant	Sortie	AFR	l/kg
Débit d'air nécessaire	Sortie	D_{ven}	l/s

Entrées, sorties et paramètres du moteur			
Nom	**Type**	**Symbole**	**Unité**
Puissance électrique	Entrée	P	W
Rendement du moteur	Entrée	η	$-$

Entrées, sorties et paramètres du Cyclone			
Nom	**Type**	**Symbole**	**Unité**
Diamètre	Sortie	D_c	m
Largeur d'entrée	Sortie	B_c	m
Diamètre de sortie	Sortie	D_e	m
Hauteur d'entrée	Sortie	H_c	m
Section cylindrique de la hauteur	Sortie	L_c	m
Section de la conduite de sortie	Sortie	S_c	m
Hauteur de la section conique	Sortie	Z_c	m
Diamètre de la section inférieure	Sortie	J_c	m
Pression	Sortie	ΔP_{cyc}	Pa

Entrées, sorties et paramètres tuyauterie (soufleur-brûleur)			
Nom	**Type**	**Symbole**	**Unité**
Diamètre	Sortie	Φ_{tvb}	cm
Débit d'air	Sortie	u_{tvb}	cm/s

Entrées, Sorties et Paramètres du brûleur			
Nom	**Type**	**Symbole**	**Unité**
Perte de chaleur	Entrée	Φ_{bru}	W
Conductivité thermique de l'isolant	Input	λ_{iso}^{bru}	W/mK
Température du syngaz sortant	Paramètre	T_{bru}	$\circ C$
Taux de gazéïfication spécifique	Paramètre	SGR	kg/hm^2
Facteur de calibration chimique	Paramètre	k_α	$-$
Fraction massique des cendres produits	Paramètre	fm_{cen}^{bio}	kg/kg
Quantité de biomasse	Sortie	MBN	kg
Syngaz produit	Sortie	VSN	Nm^3
Durée de fonctionnement	Sortie	t_c	h
Consommation de la biomasse	Sortie	DCB	kg/h
Taux de production du syngaz	Sortie	DSN	Nm^3/h
Pouvoir calorifique inférieur (Biomasse)	Sortie	PCI_{bio}	kJ/kg
Pouvoir calorifique inférieur (syngaz)	Sortie	PCI_{syn}	kJ/Nm^3
Rendement de la gazéïfication	Sortie	η_g	$-$
Pression de sortie du gaz de synthèse	Sortie	p_{sor}	Pa
Rayon	Sortie	r_{bru}	cm
Hauteur	Sortie	h_{bru}	cm
Volume	Sortie	V_{bru}	l
Epaisseur de l'isolant	Sortie	e_{iso}	cm
Débit d'air dans le brûleur	Sortie	u_{airh}^{bru}	cm/s
Débit de syngaz dans le brûleur	Sortie	u_{synh}^{bru}	cm/s
Cendre produit	Sortie	MCP	kg
Composition humide syngaz	Sortie	fm_i^{synh}	mol/mol
Composition sèche syngaz	Sortie	fm_i^{syn}	mol/mol
Capacité thermique du syngaz humide	Sortie	Cc_{synh}	$J/molK$
Chaleur spécifique du syngaz humide	Sortie	Cs_{synh}	J/kgK

Tab. 4.1.: Entrées, sorties et paramètres d'un mini-gazogène constitué d'un souffleur, d'un brûleur, d'un cyclone, de plusieurs tuyauteries et d'un moteur électrique

Quelques équations *SIZER*			
Name	**Equation**	**System**	**Reference**
Mole fraction of water in humid air	$fv_{H_2O}^{air\,h} = \dfrac{\dfrac{h_{abs}}{mm_{H_2O}} \cdot R \cdot T_{ext}}{p_{ext}} = fmol_{H_2O}^{air\,h}$	Fan	[**Clapeyron1834**]
Stoichimetric air	$AS_{mol} = \dfrac{fmol_C^{bio} + \frac{1}{4} \cdot fmol_H^{bio} - \frac{1}{2} \cdot fmol_O^{bio}}{fmol_{O_2}^{air\,h}}$	Fan	[**Eastop2009**]
Equivalence ratio	$\epsilon = \dfrac{(0,5 \cdot k_{CO} + k_{CO_2}) \cdot fmol_C^{réa} + 0,25 \cdot (fmol_{H_2}^{réa} - 2 \cdot k_{H_2} \cdot fmol_C^{réa}) - 0,5 \cdot fmol_O^{réa}}{fmol_{O_2}^{air\,h} \cdot AS_{mol}}$	Fan	[**Eastop2009**]
Lower Heating Value of biomass	$PCI_{bio} = 33.823 \cdot fm_C^{bio} + 121.076 \cdot (fm_H^{bio} - fm_O^{bio}/8) + 9.419 \cdot fm_S^{bio}$	Reactor	[**HM2013**]
Lower Heating Value of syngas	$PCI_{syn} = 12.600 \cdot fv_{CO}^{syn} + 10.775 \cdot fv_{H_2}^{syn} + 35.800 \cdot fv_{CH_4}^{syn}$	Reactor	[**Calle1985**]
Thickness of insulation of reactor	$ln\left(\dfrac{r_{brû} + e_{iso}^{brû}}{r_{brû}}\right) = \dfrac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{iso}^{brû} \cdot (r_{brû} + h_{brû}) \cdot (T_{brû} - T_{ext})}{\Phi_{brû} \cdot 10^2}$	Reactor	[**Jannot2012**]
Reynolds Transport Theorem applied to quantity of motion	$\sum \vec{F}_{ext} = \left.\dfrac{d(m\vec{u})}{dt}\right\|_{Sis} = \int_{VC} \dfrac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t}\, dV + \int_{SC} \rho\vec{u}\,(\vec{u} \cdot \vec{n})\, dS$	Piping	[**Reynolds**]
Leaving syngas pressure	$p_{sor} = \dfrac{p_{ext} \cdot S_{tvb} + \rho_{syn\,h}^{CN} \cdot DSN \cdot u_{syn\,h}^{sor} \cdot 36^{-1} - \rho_{air\,h}^{CN} \cdot D_{ven} \cdot u_{air\,h}^{tvb} \cdot 10^{-1}}{S_{tbc}}$	Piping	[**Reynolds**]
Entering cyclone syngas temperature	$T_{ent} = \dfrac{\dot{m}_{syn\,h}^{tbc} \cdot Cc_{syn\,h} \cdot T_{sor} - \dfrac{\frac{T_{sor}}{2} - T_{ext}}{\frac{1}{h_{tci} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L_{tbc} \cdot r_{tbc} \cdot 10^{-4}} + \frac{ln\left(\frac{r_{tbc} + e_{tuy}^{tbc}}{r_{tbc}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L_{tbc} \cdot \lambda_{tuy}^{tbc} \cdot 10^{-2}} + \frac{ln\left(\frac{r_{tbc} + e_{tuy}^{tbc} + e_{iso}^{tbc}}{r_{tbc} + e_{tuy}^{tbc}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L_{tbc} \cdot \lambda_{iso}^{tbc} \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{h_{tce} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L_{tbc} \cdot \left(r_{tbc} + e_{tuy}^{tbc} + e_{iso}^{tbc}\right) \cdot 10^{-4}}}}{\dot{m}_{syn\,h}^{tbc} \cdot Cc_{syn\,h} + \dfrac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{h_{tci} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L_{tbc} \cdot r_{tbc} \cdot 10^{-4}} + \frac{ln\left(\frac{r_{tbc} + e_{tuy}^{tbc}}{r_{tbc}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L_{tbc} \cdot \lambda_{tuy}^{tbc} \cdot 10^{-2}} + \frac{ln\left(\frac{r_{tbc} + e_{tuy}^{tbc} + e_{iso}^{tbc}}{r_{tbc} + e_{tuy}^{tbc}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L_{tbc} \cdot \lambda_{iso}^{tbc} \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{h_{tce} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L_{tbc} \cdot \left(r_{tbc} + e_{tuy}^{tbc} + e_{iso}^{tbc}\right) \cdot 10^{-4}}}}$	Cyclone	[**Jannot2012**]
Pressure drop in the cyclone	$\Delta p^{cyc} = \dfrac{\rho_{syn\,h}^{ent} \cdot \left(\dfrac{\rho_{syn\,h}^{CN}}{\rho_{syn\,h}^{ent}} \cdot \dfrac{DSN}{3,6 \cdot 10^3}\right)^2 \cdot 6,374}{B_c \cdot H_c \cdot D_e^2}$	Cyclone	[**Hand1988**]

Tab. 4.2.: Quelques équations sous *SIZER*

composition du syngaz, le pouvoir calorifique inférieur ainsi que la capacité à fournir les dimensions optimales d'un gazogène.

Concernant les tests de simulation de la composition du syngaz et de son pouvoir calorifique, nous nous sommes appuyés sur les travaux menés par Patuzznd al. au sud de la ville de Tyrol (en Italie). L'étude a porté sur 4 dispositifs expérimentaux (A, B, C et D) de technologies différentes. Pour résumer : la technologie A représente un gazogène de type "downdraft" co-courant descendant qui fonctionne à une puissance nominale de 45 kWel avec une puissance électrique nominale égale à 23 %. Ce type de gazogène est appelé "Joos Gasier". La technologie B est de la même famille des "downdraft" co-courant mais ascendant. Il produit une puissance nominale comprise entre 180 et 190 kWel. Cette technologie a la meilleure puissance électrique nominale de tous les gazogènes présentés dans cette étude. Pour plus d'informations sur cette technologie, voir [27]. Dans la technologie C, le réacteur du gazogène est très semblable à celui de la technologie A. Il s'agit de la catégorie de gazogène à courant descendant d'une puissance nominale comprise entre 100 et 150 kWel. La technologie D est de la famille des gazogènes à lit fixe à tirage descendant. La puissance nominale produite par ce système est égale à 300 kWel.

Le Tableau 4.3 indique la composition mesurée de la biomasse considérée lors des expérimentations et injectée dans chacun des quatre gazogènes (A, B, C et D).

	C	**H**	**N**	**O**
Gazogène A	51,17	5,97	0,37	42,00
Gazogène B	51,20	6,02	0,10	42,38
Gazogène C	51,20	5,95	0,10	42,35
Gazogène D	50,95	5,68	0,67	42,30
Moyenne	51,13	5,91	0,31	42,26

Tab. 4.3.: Composition (en %) de la biomasse utilisée dans chaque dispositif et moyenne de cette composition.

Les moyennes de chaque composition de biomasse seront celles utilisées dans le logiciel SIZER pour permettre de réaliser la simulation. La Figure 4.4 montre les différentes valeurs de la fraction molaire mesurées d'une part sur les quatre dispositifs et simulées d'autre part par SIZER.

Les valeurs de pouvoir calorifique inférieur obtenues par les expériences et la simulation sur SIZER ont été comparées (voir Figure 4.5).

Les résultats obtenus montrent une cohérence entre la composition du gaz de synthèse et le pouvoir calorifique inférieur de ces quatre gazogènes en comparaison avec les estimations de SIZER. Les valeurs simulées par le logiciel correspondent clairement à celles du gazogène B. Ce gazogène est celui qui a le meilleur rendement parmi les quatre.

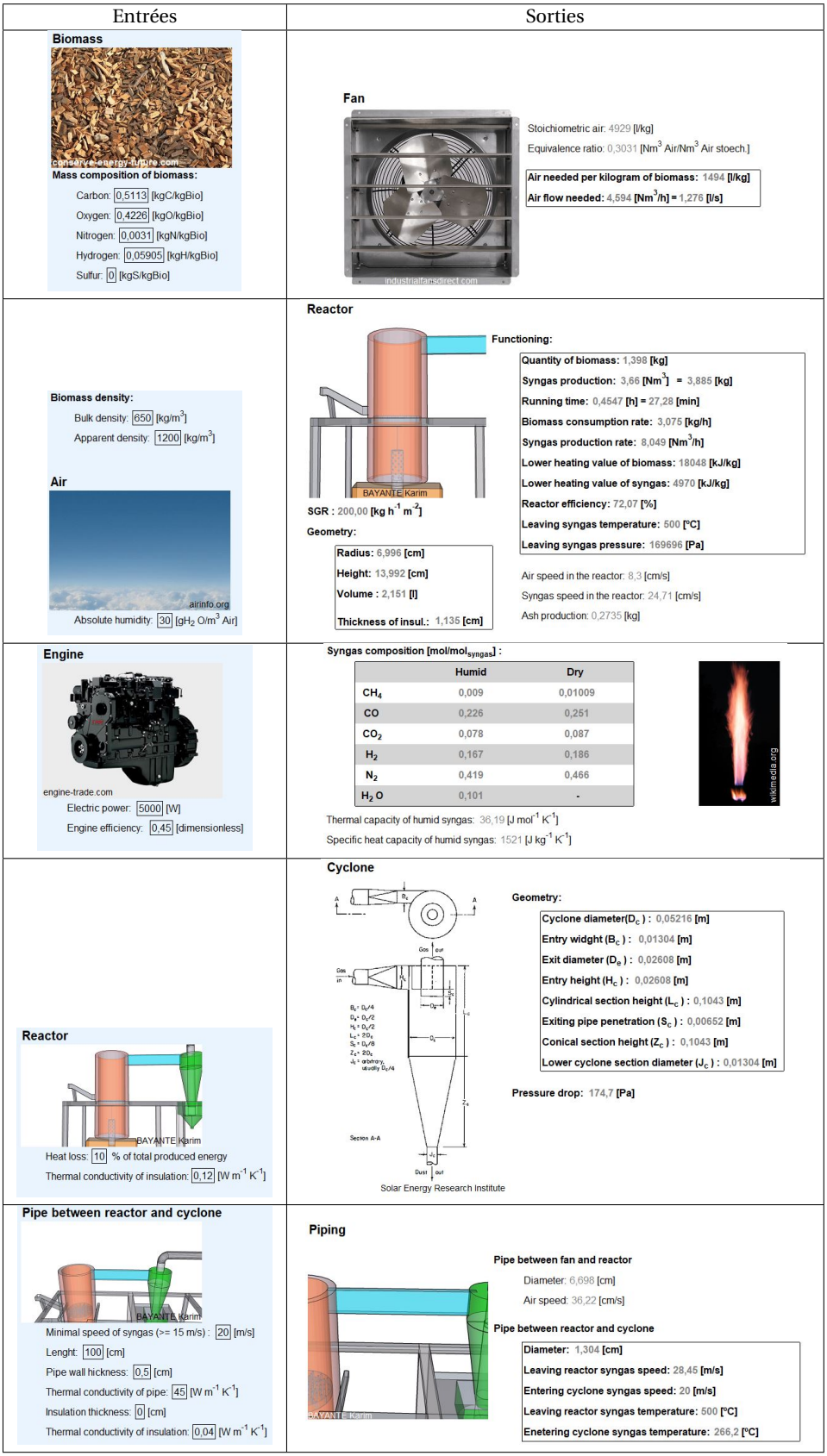

Fig. 4.3.: Interface graphique du logiciel SIZER (entrées, sorties et paramètres)

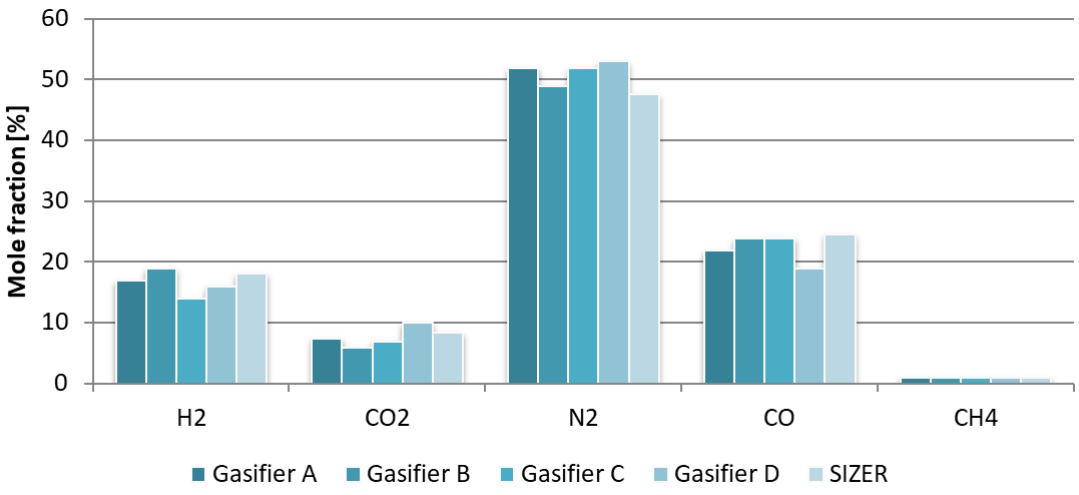

Fig. 4.4.: Composition du syngaz produit par chaque gazogène et comparaison avec SIZER [2]

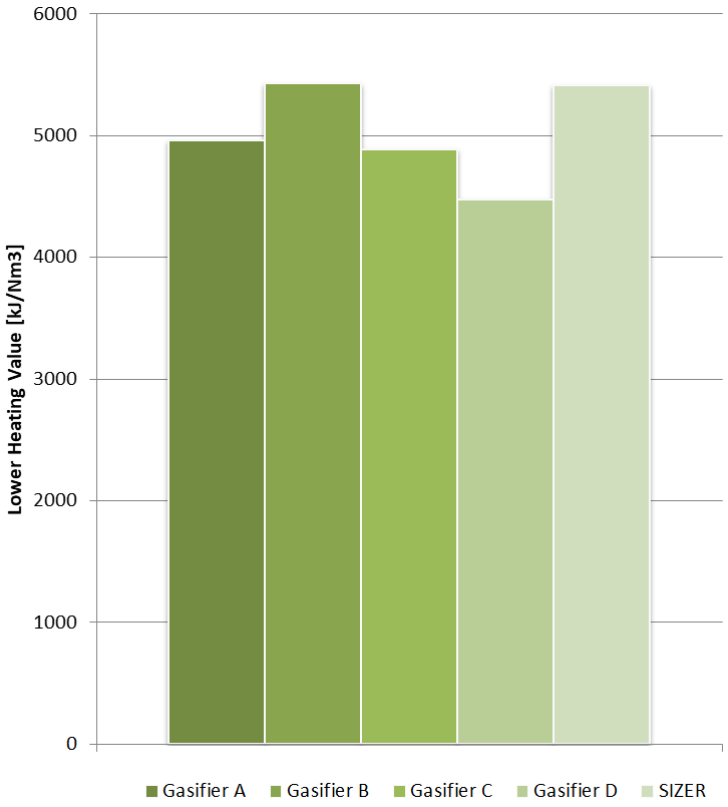

Fig. 4.5.: Pouvoir calorifique inférieur du syngaz produit par chaque gazogène et comparaison avec SIZER [2]

Nous conclusions que notre logiciel optimise très bien l'ensemble du dispositif virtuel qu'il propose en fonction des informations qui lui sont fournies (variables d'entrées).

S'agissant maintenant des dimensions optimisées d'un gazogène, nous avons réalisé la simulation d'un dispositif déjà existant dont les dimensions sont connues et avons procédé

à une comparaison. Il s'agit du système G.E.K (i.e. Gasifier Experimenter's Kit). C'est un système de gazéification à petite échelle spécialement dédié aux études expérimentales. Le système possède une chaîne de mesure et d'acquisition complète. La plupart des entreprises [17] qui travaillent dans le domaine de la recherche sur la biomasse utilisent ce type de dispositif. Une description détaillée du fonctionnement du gazogène, ainsi que les dimensions, sont données sur le site web : $http://wiki.gekgasifier.com$. Sur ce site, il est possible de télécharger les dessins CAO de toutes les pièces en tôle ainsi que ceux du moteur. La Figure 9.1 illustre le dispositif G.E.K. La comparaison entre les résultats de simulation sur SIZER et les données constructeur est présentée dans le Tableau 4.4. Afin de pouvoir réaliser les simulations sur SIZER, nous avons fixé les valeurs du débit de la biomasse. Les résultats montrent une différence significative dans la hauteur du cyclone entre la méthode de simulation et l'information donnée par le constructeur. Cette différence est due à la configuration spécifique du cyclone. Pour comprendre cette différence, la Figure 4.7 montre la configuration du cyclone G.E.K et comment le logiciel SIZER prend en compte le calcul du sous-système "cyclone".

Fig. 4.6.: Gazogène G.E.K (`http://www.allpowerlabs.com/products/gasifier-kits`)

Subsystem	Variable name	Symbol	GEK system	SIZER simulation
Boiler	Diameter	D_r	0.15 m	0.17 m
	Height	H_r	0.508 m	0.50 m
	Biomass flow rate	$Fbms$	6 $kg.h^{-1}$	5.75 $kg.h^{-1}$
Cyclone	Height	M_b	0.508 m	0.32 m
	Output diameter tubing	D	0.020 m	0.021 m
Tubing	Boiler/Cyclone diameter	-	7.6 cm	6.93 cm
	Cyclone/Engine diameter	-	4.2 cm	4.1 cm
Engine	Power	P	5 kWh	5.21 Wh

Tab. 4.4.: Comparaison entre le système G.E.K et la simulation optimisée dans SIZER

La hauteur du cyclone dans SIZER est de ($L_C + Z_c$) alors que la hauteur dans le dessin CAO du moteur G.E.K est de ($L_C + Z_c + X$). Cependant la valeur de (X) n'a pas été donnée

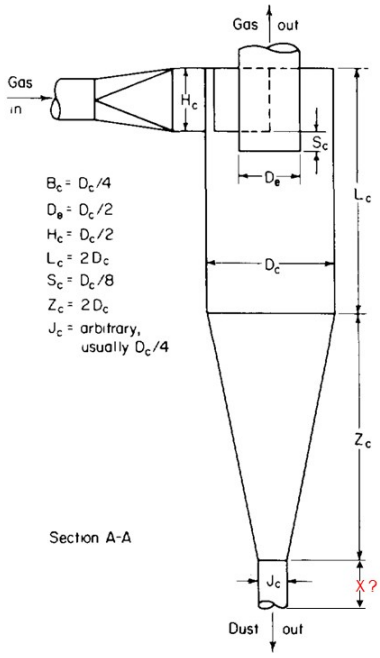

Fig. 4.7.: Dimension du cyclone G.E.K

par le constructeur, il n'est donc pas possible de la comparer. Une autre explication de cette différence entre le calcul du SIZER et la dimension réelle du G.E.K est que SIZER optimise considérablement le système par rapport à celui proposé par le constructeur. En effet, le logiciel propose de réduire la hauteur du cyclone pour produire 0.21 Wh de puissance en plus avec un débit de biomasse moins élevé d'environ 0.25 $kg.h^{-1}$. Dans les deux cas, SIZER semble donner des valeurs cohérentes par rapport aux dimensions proposées par le constructeur.

4.5 Publications, projets/financements et brevet associés au sujet 2

- Revues spécialisées avec comité de lecture (1) :
  1. [*B*18] : M. H. Radanielina, **D. A. H. Fakra**, D. Morau, J. Abgrall, A systemic analysis-based new tool "SIZER" to optimize sizing of small-scale gasifier system for power generation using solid wastes as feedstock. (Article en cours)
- Congrès/Colloques avec actes publiés (2) :
  1. [*C*17] : **D. Fakra**, D. Morau, K. Bayante, M. H. Radanielina, T. Rakotondramiarana, Generalized protocol by systemic analysis for sizing a small scale gasifier engine system dedicated to power generation from biomass, 11th International Conference on Sustainable Energy Environmental Protection (SEEP 2018), 08 – 11 May, University of West Scotland, Paisley, UK, 2018.

2. [C18] : **D. Fakra**, C. L. Javier, D. Morau, J. P. Praene, T. Rakotondramiarana, A. Lauret, SIZER : a software dedicated to simulating the optimum size of a small biomass gasifier system, 3rd International Conference on Energy, Environment and Climate Change (ICEECC 2019), 2-4 July, The Westin Turtle Bay Resort Spa, Balaclava, Mauritius, 2019.

- Autres : documents internes, fascicules, rapports, etc.(2) :
  1. [*Document*1] : Karim BAYANTE, Titre : Protocole généralisé de dimensionnement d'une mini-centrale gazogène dédiée à l'électrification à partir de la biomasse, stage de recherche de niveau Licence 3 (2 mois) soutenu le 18 juin 2017, Université de la Réunion, encadrement : 100% (travaux publiés dans un congrès international).
  2. [*Document*2] : Javier CACERES LOBOS, Titre : Optimisation de forme d'un mini-gazogène dédié à la production de l'électricité, stage de recherche de niveau Ingénieur (4 mois) soutenu le 17 juillet 2018. Université de Grenade (ERASMUS), encadrement : 100%.
- Projets/Financements (3) :
  1. [*F*04] : Appel à projet (interne) de l'UFR S.H.E (Université de la Réunion) : **D. Fakra** (co-porteur), Jean Claude Gatina. Achat d'un mini-gazogène instrumenté dédié à la formation et la recherche, Financement accordé en juin 2018 : 30 000 €.
  2. [*F*07] : Appel à projet (interne) de l'UFR S.H.E (Université de la Réunion) : D. Morau, J. C. Gatina, **D. Fakra** (co-porteur), Achat de M matériels de mesure dédiés à un Gazogène, Financement accordé en Mars 2020 : 20 679 €.
  3. [*F*06] : Appel à Manifestation d'Intérêt Recherche Développement Innovation (AMI) de la Région Réunion (financement FEDER) : D. Morau, **D. Fakra** (co-porteur), M. H. Radanielina. Intitulé du projet : SYNBIOZER, Financement accordé en Août 2020 : 670 033 €.

Sélection synthétique de la bibliographie sur le sujet 2 : logiciel SIZER

[ACgu] Ecole Polytechnique de Marseille. Prof. Ferruccio Pittaluga Università degli Studi di Genova Laboratorio DIMSET/SCL ALICE CHAUVIN Victor FARAUD. „Simulation de la gazéification de bois et vérification expérimentale avec un gazéificateur pilote de 10 kWél“. In : *Internship report* (August 2008) (cf. p. 27).

[al.r] S. Altmeyer et AL. „Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software“. In : *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 43.4 (Apr. 2004), p. 511-522 (cf. p. 26).

[E.Br] J.N.Chung E.BALU. *System characteristics and performance evaluation of a trailer-scale downdraft gasifier with different feedstock.* T. 108., Mar. 2012, p. 264-273 (cf. p. 26).

[F.Cn] E.E.Silva Lora R.V.Andrade F.CENTENO K.Mahkamov. „Theoretical and experimental investigations of a downdraft biomass gasifier-spark ignition engine power system“. In : *Renew. Energy* 37.1 (Jan. 2012), p. 97-108 (cf. p. 26).

[JLb] R.V.Andrade J.MARTÍNEZ K.Mahkamov et E.E.Silva LORA. „Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines“. In : *Renew. Energy* 38.1 (Feb. 2012), p. 1-9 (cf. p. 26).

[LWHl] D. D. Jones L. WANG C. L. Weller et M. A. HANNA. „Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production“. In : *Biomass Bioenergyy* 32.7 (Jul. 2018), p. 573-581 (cf. p. 26).

[MPACc] J. C. Bruno M. PUIG-ARNAVAT et A. CORONAS. „Review and analysis of biomass gasification models“. In : *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14.9 (Dec. 2010), p. 2841-2851 (cf. p. 26).

[R.G12] R.GICQUEL. *Energy Systems : A New Approach to Engineering Thermodynamics.*, 2012 (cf. p. 26).

[RGBc] C. Pizarro A. G. Lavín R. GARCÍA A. Álvarez et J. L. BUENO. *Size-up, monitorization, performance optimization and waste study of a 120 kW in-use wood pellet boiler : A case study*. T. 27., Dec. 2018, p. 33-43 (cf. p. 26).

[TG17] T.WANG et G.STIEGEL. *1 - An overview of IGCC systems in Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies.*, 2017, p. 1-80 (cf. p. 26).

[W.Ll] X.Zhu X.Wang C.Liu B.Xu W.LAN G.Chen. *Biomass gasification-gas turbine combustion for power generation system model based on ASPEN PLUS*. T. 628–629., Jul. 2018, p. 1278-1286 (cf. p. 26).

5 Pilotage multi-échelle spatio-temporel des flux d'énergie dans les espaces bâtis et développement d'un outil numérique 2D dédié

Dans ce sous-chapitre, un outil de simulation dénommé SMARTEN (Smart Management AlgoRiThm of Electricity Network) sera décrit. Le code développé permet de gérer un environnement de réseau intelligent. L'énergie du réseau électrique actuel sera mélangée à de l'énergie renouvelable et à de l'énergie provenant d'un système de stockage pour répondre aux demandes énergétiques des bâtiments connectés. Le principe de fonctionnement du nouveau logiciel qui comprend la description de deux nouveaux algorithmes développés lors de ces travaux basés sur des scénarios en lien avec le stockage, la présentation de l'interface utilisateur graphique, les variables d'entrée et de sortie de la simulation et les paramètres dont le logiciel a besoin pour fonctionner, quelques tests de fiabilité du logiciel basés sur la comparaison des éléments de validation avec le logiciel HOMER et enfin une conclusion générale, suivie d'une réflexion sur les perspectives d'amélioration liées au logiciel seront également décrits.

Table des matières du chapitre 5

5.1 Historique du logiciel SMARTEN 42

5.2 Contexte et problématique scientifique 42

5.3 Outils et méthodologie développés 45

5.4 Résultats des travaux scientifiques réalisés 58

5.5 Publications, projets/financements et brevet associés au sujet 3 63

Sélection synthétique de la bibliographie sur le sujet 3 : logiciel SMARTEN 67

5.1 Historique du logiciel SMARTEN

l'idée de ces codes de calcul a été initiée à la base par le professeur Jean-Claude GATINA. Le premier algorithme de pilotage a été réalisé par Nidhoimi [NID18] en 2018. Le code a ensuite connu une évolution dans les travaux de thèse de Ranjaranimaro [RAN19] en 2019. J'ai ensuite encadré deux stages de recherche, fin 2019 et en 2020, d'une part pour développer l'interface graphique de l'outil [Document5] et d'autre part pour améliorer l'outil de simulation en apportant des modifications conséquentes telles que l'ajout d'une interface 2D et de deux algorithmes supplémentaires associés à de nouveaux scénarios de pilotage réseau basés sur l'état des batteries de stockage d'énergie ([A05] et [Document6]). Nous verrons ce dernier point en détail dans ce qui va suivre.

5.2 Contexte et problématique scientifique

L'énergie est un des flux fondamentaux à observer dans le fonctionnement de tout système et notamment des systèmes complexes. Elle intervient dans tous les secteurs d'activité, notamment le transport, l'industrie, le logement, l'agriculture, le bâtiment, etc. Les pays les plus développés ont une consommation d'énergie très importante [CW17]. Au niveau mondial, la production énergétique reste dominée par les sources d'énergie fossile [MFS18]. L'économie et la consommation d'énergie fossile d'un pays sont étroitement liées [MFW18], [Men+19]. Le caractère épuisable et polluant de ces énergies fossiles [FHA11] ainsi que la croissance de la demande énergétique mondiale sont les principaux facteurs qui nous incitent à nous inscrire dans la transition énergétique. Ainsi, l'utilisation des sources d'énergie renouvelable est encouragée pour faire face aux problèmes d'épuisement et de pollution des ressources d'énergie fossile [Edi19], [Gie+19]. Néanmoins, les sources d'énergie renouvelable sont intermittentes et nécessitent d'avoir des systèmes de stockage appropriés dans certains scénarios [Tra17], [LZ19]. Ainsi, pour satisfaire pleinement les besoins en énergie, un système de ce mix énergétique couplé à des batteries de stockage doit être proposé. Les sources d'énergie non renouvelable et celles renouvelable sont mélangées pour satisfaire la demande. Ce mélange énergétique qui tient compte de la charge et décharge des batteries doit être géré de manière à optimiser son utilisation à partir d'un réseau électrique dit intelligent ou "smart grid".

Les réseaux intelligents ont de nombreuses définitions dans la littérature. Dileep G. [Dil20] a regroupé quelques définitions du smart grid dans une enquête. Selon la plateforme technologique européenne : "Un réseau intelligent est un réseau d'électricité qui peut intégrer intelligemment les actions de tous les utilisateurs qui y sont connectés - producteurs, consommateurs et ceux qui font les deux - afin de fournir efficacement un approvisionnement en électricité durable, économique et sûr". De la même manière, le ministère américain de l'énergie déclare : "Un réseau intelligent utilise la technologie

numérique pour améliorer la fiabilité, la sécurité et l'efficacité (tant économique que énergétique) du système électrique, depuis la production à grande échelle jusqu'aux systèmes de distribution aux consommateurs d'électricité, en passant par un nombre croissant de ressources de production et de stockage réparties". Par conséquent, les dernières technologies, l'informatique, les outils et la technique seront pris en considération pour insérer une forme d'intelligence dans le réseau électrique [SHC18] afin d'optimiser la distribution des flux d'énergie et d'intégrer les sources d'énergie renouvelable.

Les avantages associés au réseau intelligent [Sma] sont notamment les suivants :

— Une transmission plus efficace de l'électricité
— Un rétablissement plus rapide de l'électricité après des perturbations
— Réduction des coûts d'exploitation et de gestion pour les services publics, et en fin de compte réduction des coûts de l'énergie pour les consommateurs
— Réduction de la demande de pointe, ce qui contribuera également à faire baisser les tarifs de l'électricité
— Intégration accrue des systèmes d'énergie renouvelable à grande échelle
— Meilleure intégration des systèmes de production d'électricité des clients-propriétaires, y compris les systèmes d'énergie renouvelable
— Amélioration de la sécurité

De nombreuses méthodes et outils de pilotage d'un réseau électrique constitué d'un mix energétique existent dans la littérature (voir [SC14], [Con+10], [Suk+17], [Wor+19] et [NRR14]). Certains traitent de la relation entre la conception du bâtiment, le mix énergétique associé à ce bâtiment et le coût de l'énergie (production et consommation) [Asc+16]. D'autres ne se focalisent que sur l'optimisation de ces systèmes vis-à-vis de l'environnement dans lequel ils sont installés.

Étant donné la multitude de logiciels existant au monde, Dave Turcotte et al. (voir [TRS01]) ont proposé de les classifier en quatre catégories :

— les outils de pré-projet : principalement utilisés pour évaluer s'il existe une opportunité globale de mise en œuvre du système, cette catégorie d'outil débouche sur une analyse de dimensionnement approximative et comprend souvent une analyse complète des coûts et des finances (par exemple RETScreen) ;
— les outils de dimensionnement : ils effectuent un calcul des dimensions du système ; les utilisateurs peuvent insérer un besoin en énergie et l'outil déterminera la taille optimale de chaque composant lié au système ; les flux d'énergie entre les composants et certaines indications sur les périodes critiques de l'année sont fournies par la plupart des outils de dimensionnement (par exemple HOMER) ;
— les outils de simulation : l'utilisateur doit spécifier la nature et la taille de chaque composant, une analyse du comportement du système est alors fournie par l'outil (par exemple HYBRID 2) ;

— les outils de recherche en architecture ouverte : les outils de simulation traditionnels ne permettent pas aux utilisateurs de modifier les algorithmes, le comportement ou les interactions des différents composants, tandis que dans un outil de recherche en architecture ouverte, la modification des routines existantes et l'ajout de nouvelles routines sont autorisés (par exemple TRNSYS). Les organismes de recherche choisissent cette catégorie d'outil en raison de leur flexibilité et de leur puissante application.

Luis Arribas et al. [AL11] ont proposé, quant à eux, une autre méthode de classification des outils du système hybride. Un récapitulatif sur la disponibilité, les caractéristiques et l'application des outils couramment utilisés a été réalisé et dix logiciels représentatifs ont été examinés et détaillés dans leur document. Ils ont également présenté des lignes directrices et des recommandations sur l'utilisation des outils logiciels pour la conception de systèmes photovoltaïques (PV) hybrides. Dans leur rapport, quatre catégories ont également été déclarées :

— Dimensionnement : correspond aux outils de dimensionnement de la classification de Dave Turcotte et al. [TRS01] ;

— Simulation : correspond aux outils de simulation de la classification de Dave Turcotte et al. [TRS01] ;

— Recherche : correspond aux outils de recherche en architecture ouverte de la classification de Dave Turcotte et al. [TRS01] ;

— Outils de conception de mini-réseau : ces outils aident à la conception du réseau de distribution électrique de mini-réseau.

Une étude a prouvé que le logiciel le plus utilisé dans le domaine du pilotage était Energy+ [NRR14]. Toutefois, l'algorithme sur lequel est basé le logiciel ne prend pas forcément en compte toutes les variétés de scénarios possibles à la fois d'optimisation du système et de pilotage de l'ensemble, et ce, quels que soient les niveaux d'échelle. Un autre logiciel très utilisé également dans le domaine du pilotage du mix énergétique est RETScreen (voir [TRS01]). L'inconvénient de ce logiciel est qu'il ne peut être utilisé qu'en phase de pré-projet et donc pas vraiment adapté pour faire de la recherche. De même, il existe un autre logiciel dénommé HOMER (voir [TRS01]), qui s'applique bien dans le domaine du pilotage, mais qui reste au stade de dimensionnement d'un système unique (un seul bâtiment) et non pas de l'ensemble des espaces bâtis inter-connectés (plusieurs bâtiments, plusieurs villes, etc.).

C'est dans ce contexte scientifique qu'une solution a été proposée dans nos travaux de recherche afin de venir compléter les algorithmes déjà existants. Les études menées dans cette thématique ont permis de mettre en place deux nouveaux types d'algorithmes de pilotage du mix énergétique, basés cette fois-ci principalement sur l'état des batteries de stockage (limite haute et limite basse de stockage), combinés à deux nouveaux scénarios possibles, et non plus sur les variables classiques de consommation (la demande) et de production (l'offre) électrique. Ces algorithmes seront décrits dans ce qui suit.

5.3 Outils et méthodologie développés

SMARTEN pilote 4 secteurs dans le mix énergétique d'un réseau intelligent inter-connecté : le système de production (SP), le système de consommation (SC), le système de stockage (STO) et le réseau électrique conventionnel (RES). Chaque secteur dépend fortement d'un ensemble de sous-systèmes qui n'ont pas besoin d'être pris en compte lors de la simulation sous SMARTEN car impactant directement (SP), (SC), (STO) et (RES). Chaque sous-système donnera lieu à la création d'un ou plusieurs fichier(s) horaire(s) d'informations du système global observé et de stockage associé.

Ainsi le processus de production, de transmission et de distribution n'est pas pris en compte dans la simulation. Ces processus sont considérés comme des sous-systèmes d'un système de réseau (RES). Ainsi, pour effectuer une simulation dans SMARTEN, le système de réseau est représenté par l'énergie fournie par le réseau et disponible pour les clients finaux.

La simulation dans SMARTEN de (SP) ne tient pas compte du type de système d'énergie renouvelable produit ni du mix de ces différentes formes d'énergie. SMARTEN ne tient compte que de l'énergie renouvelable globale disponible qui a été générée par chaque espace bâti.

S'agissant du profil de consommation (SC), SMARTEN considère quatre types de consommation possibles : résidentielle, industrielle, communautaire et commerciale.Un profil de charge est ensuite attribué à chaque type de bâtiment à travers ses besoins (voir [MDT11], [YS05]. Afin de réaliser une simulation dans SMARTEN, le système de consommation est représenté par le besoin en énergie électrique de chaque bâtiment pour chaque heure.

Le système de stockage (STO), quant à lui, comprend des technologies et des transformations pour le stockage de l'énergie électrique. Dans le cadre de l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau, de nombreux travaux de recherche ont été menés sur des algorithmes prenant en compte le système de stockage et leur intégration dans le réseau (voir [Fai+18], [PK16], [Ker+16] et [Chr16]). Il en ressort que le système de stockage, hybride ou non, dépend de la situation géopolitique et climatique de chaque pays. Le choix du système (STO) dépend de l'application finale et des besoins. Le système de stockage est une partie importante d'un réseau intelligent. Il est utilisé pour stocker l'énergie et lisser l'extraction du réseau pendant les pics de consommation. Dans notre étude, il est le point focal du pilotage de l'ensemble du réseau. Pour effectuer une simulation dans SMARTEN, le système de stockage est représenté par l'énergie disponible du système de stockage (processus d'extraction) et attribuée au système de stockage (processus de charge). Comme paramètres, la limite supérieure et la limite inférieure du système de stockage sont également prises en compte. Le processus de conversion est pris en

considération dans l'une des deux stratégies proposées dans SMARTEN. Le modèle de stockage considéré est celui d'une batterie.

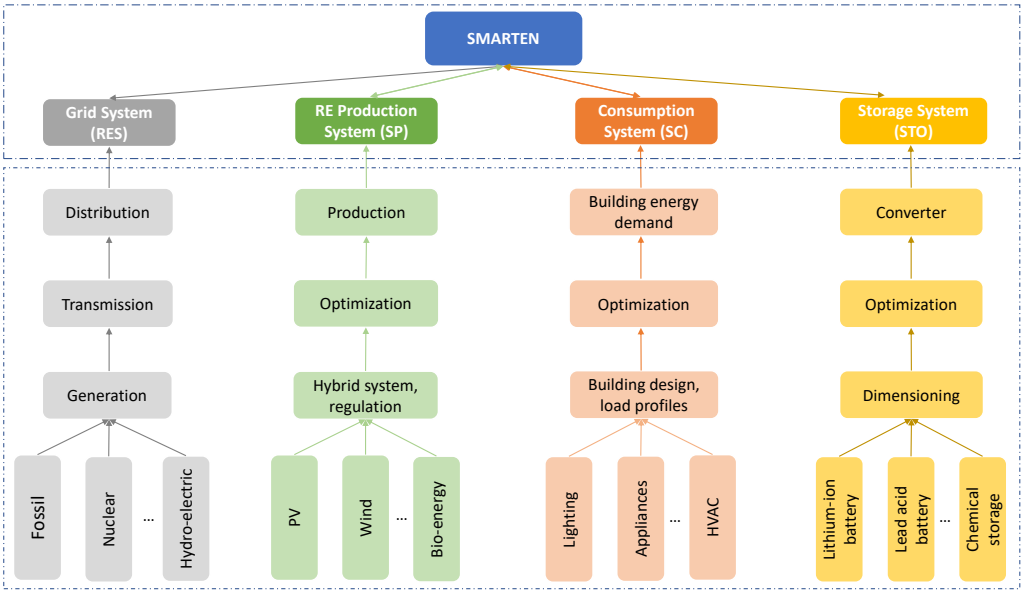

Fig. 5.1.: Niveau d'échelle de simulation sous SMARTEN

La description des deux algorithmes de SMARTEN repose sur un principe simple : la gestion de la distribution d'énergie dans un espace bâti consiste à connaître la situation des différents systèmes pour chaque heure. SMARTEN peut travailler sur une base horaire et interagit avec quatre systèmes distincts :

— Le système de production d'énergie renouvelable

— Le système de consommation

— Le système de stockage

— Le système de retrait du réseau.

La figure ci-dessous illustre nos propos sur ce pilotage du mix énergétique.

SMARTEN interagit avec ces quatre systèmes toutes les heures pour gérer la distribution du flux d'énergie électrique (voir Figure 5.2). Pour ce faire, l'outil a besoin d'informations sur les systèmes de production et de consommation ainsi que sur la situation du système de stockage au cours de l'heure précédente.

SMARTEN dispose de deux stratégies de contrôle en fonction de l'objectif final de l'utilisateur. Nous appellerons ces stratégies : Stratégie 1 (voir [C19]) et Stratégie 2 (voir [C20]. La principale différence est l'objectif de ces stratégies. La stratégie 1 vise à minimiser les pics de consommation et à lisser la courbe de consommation d'énergie tandis que la stratégie 2 vise à maximiser l'utilisation des énergies renouvelables et à préserver l'environnement. Ces deux stratégies visent donc toutes les deux l'efficacité énergétique, mais procèdent d'une façon différente.

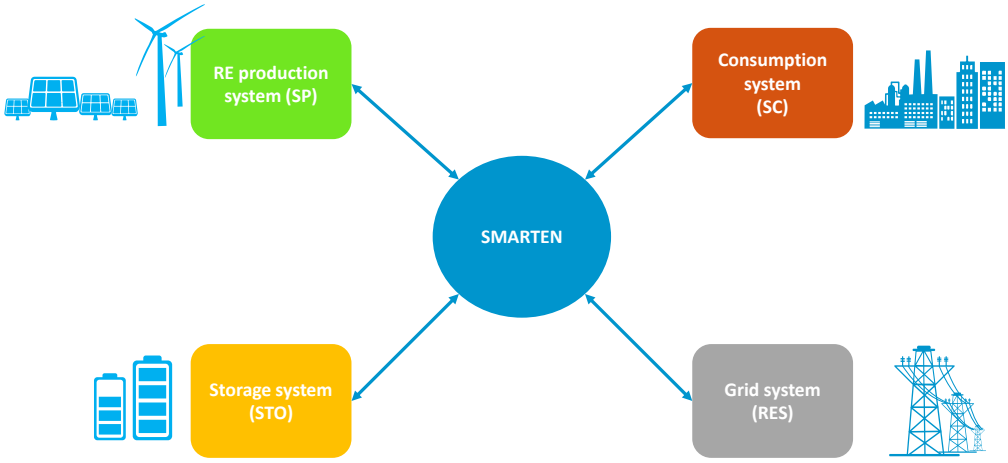

Fig. 5.2.: Relation entre les systèmes

SMARTEN est donc construit selon une logique algorithmique composée de plusieurs scénarios possibles du mix énergétique. Chaque scénario est caractérisé par l'état des variables d'entrée ainsi que par la décision de contrôle exprimée par les variables de sortie (analyse systémique). À chaque étape, l'algorithme évalue la production ainsi que la consommation et prend ensuite une décision sur la répartition des flux d'énergie au niveau du stockage, des sources renouvelables et du réseau. L'algorithme indique également s'il y a ou non un excès d'énergie renouvelable produite. Les données d'entrée sont modélisées dans un format matriciel. Il a donc été judicieux de choisir l'environnement informatique Matlab pour coder SMARTEN car très pratique pour réaliser des calculs matriciels. Les données d'entrée sont représentées par une matrice $m * n$:

— m : lignes qui représentent le pas de temps (une heure) de la simulation

— n : colonnes qui représentent les bâtiments liés à l'environnement considéré

La stratégie 1 est de minimiser les pics de consommation et de lisser la courbe de consommation d'énergie. À cette fin, lorsque la consommation est proche d'une limite définie, l'énergie est extraite des systèmes de stockage pour éviter une extraction excessive du réseau. Ainsi, la priorité est donnée à la charge des systèmes de stockage et la stratégie 1 permet d'économiser les coûts énergétiques de l'extraction du réseau. Le Tableau 5.1 présente les données relatives à la stratégie 1 et le schéma du processus de la stratégie 1 est présenté dans la Figure 5.3.

L'algorithme de la stratégie 1 porte sur le système de production et le système de consommation pour décider comment l'énergie doit être extraite du réseau électrique ou du système de stockage et vérifier s'il y a une production d'énergie excédentaire. Il existe deux principaux cas de figure :

Tab. 5.1.: Liste des données de la stratégie 1

Données d'entrées	SP	Système de production des énergies renouvelables
	SC	Système de consommation
Paramètres	LR	Limite réseaux
	LH	Limite haute de la capacité de stokage
	LB	Limite basse de la capacité de stokage
	STOi-1	Stockage au pas de temps i
Données de sorties	RES	Résidu d'énergie
	STO	Stockage d'énergie en excès
	EXC	Excédent d'énergie produite

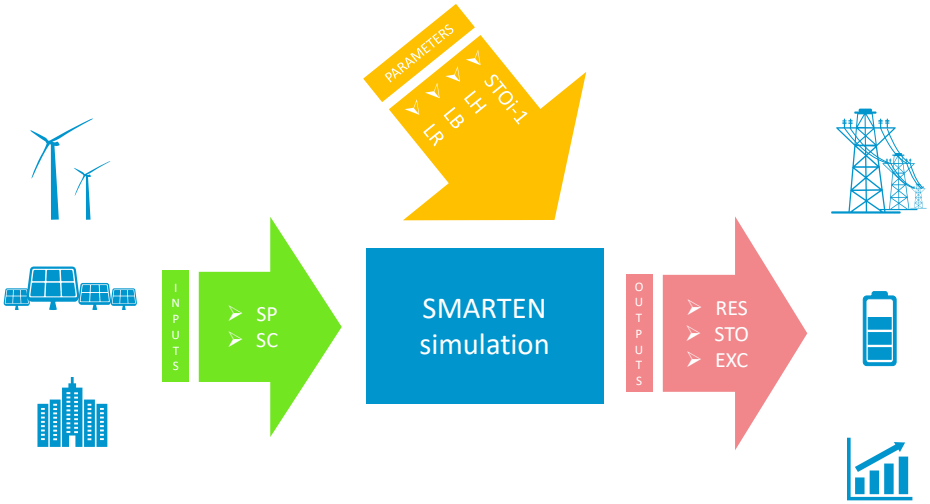

Fig. 5.3.: Schéma du processus de la strategie 1

Cas 1 : La demande est inférieure ou égale à la limite de retrait au niveau du réseau

Cas 2 : La demande est supérieure à la limite de retrait au niveau du réseau

Ces deux cas principaux peuvent être divisés en plusieurs cas afin d'affiner la gestion des flux d'énergie. La simulation dépend des paramètres importés. Les Figures 5.4 et 5.5 montrent respectivement le diagramme principal de la stratégie 1 et le diagramme de la sous-routine de calcul. Ces organigrammes déterminent comment SMARTEN gère le flux d'énergie selon chaque scénario.

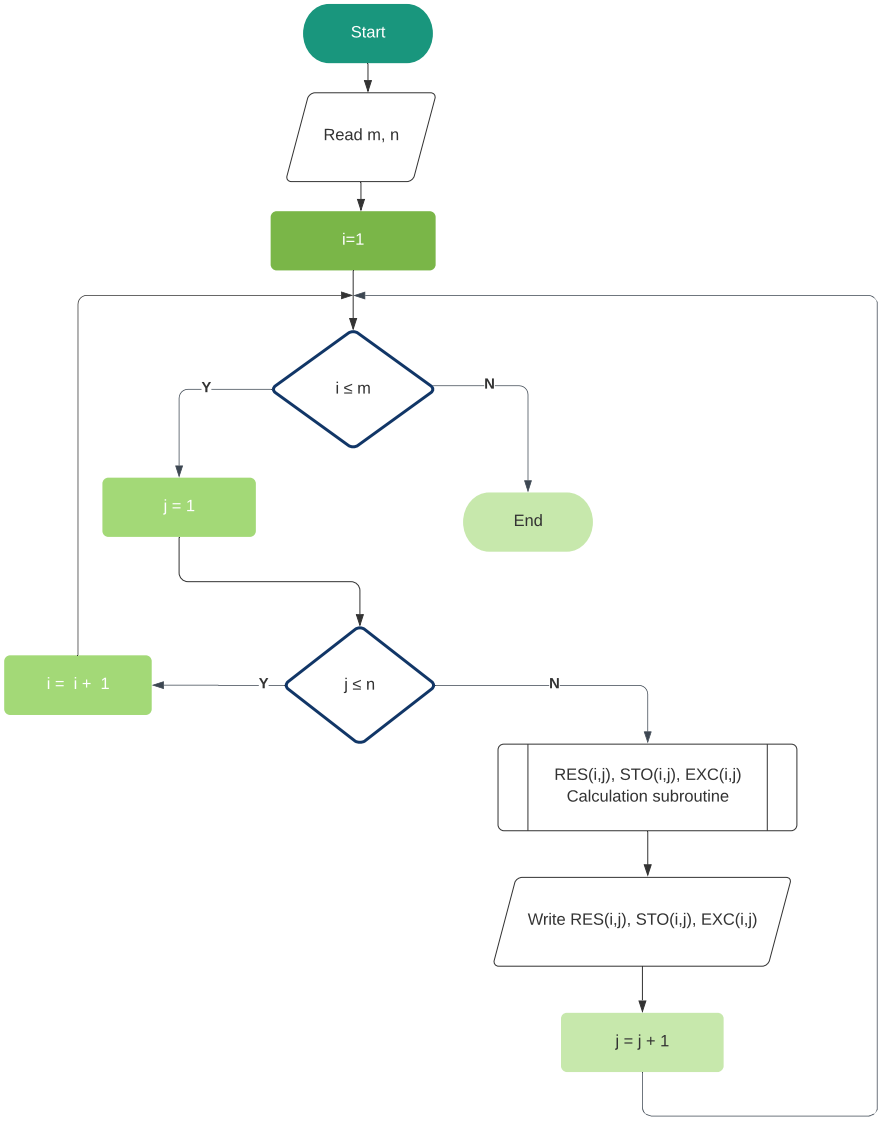

Fig. 5.4.: Organigramme de la stratégie 1

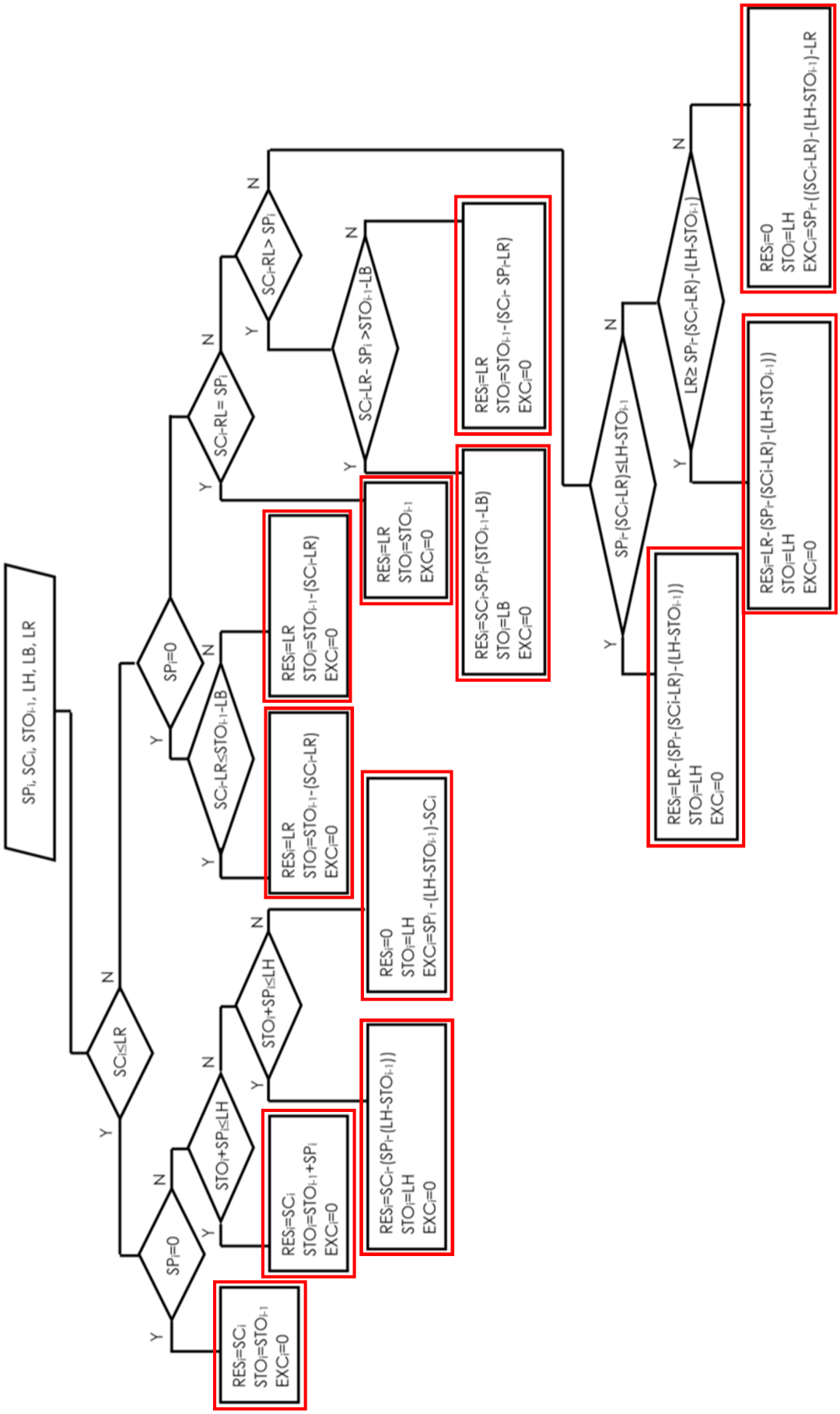

Fig. 5.5.: Organigramme du sous-programme de calcul de la stratégie 1

Le premier cas est celui où la demande d'énergie est inférieure ou égale à la limite de retrait du réseau. Par conséquent, s'il n'y a pas de production d'EnR, l'énergie sera entièrement prélevée sur le réseau. Mais s'il y a une production d'EnR et que le système de stockage a la capacité de recevoir toute la production d'EnR sans dépasser la limite supérieure de stockage, la priorité est donnée au système de stockage de charge en allouant toute la production d'EnR pour la charger. Ainsi, le réseau continue à répondre à la demande d'énergie. Si le système de stockage n'a pas la capacité de recevoir la totalité de la production d'EnR sans dépasser la limite supérieure et que la demande d'énergie est inférieure à la limite de prélèvement du réseau, le système de stockage sera chargé jusqu'à ce que la limite supérieure soit atteinte. Dans ce cas, la production d'EnR est supérieure à la capacité du système de stockage, donc la production excédentaire sera attribuée pour satisfaire la demande d'énergie et réduire le prélèvement sur le réseau.

Le deuxième cas est celui où la consommation est supérieure à la limite de prélèvement du réseau. S'il n'y a pas de production d'EnR, mais que l'énergie du système de stockage est disponible, la consommation excédentaire sera couverte par le système de stockage. La demande d'énergie sera satisfaite par le système de stockage jusqu'à ce que ce dernier atteigne sa limite inférieure de capacité. Mais si l'énergie provenant du système de stockage n'est pas suffisante, le reste sera prélevé au-delà de la limite de prélèvement du réseau. Si la production d'énergie renouvelable est suffisante pour couvrir l'excédent de consommation non réalisé par le réseau, une partie de la demande énergétique sera donc assurée par cette production d'énergie renouvelable et le système de stockage restera dans son état antérieur. S'il n'y a pas de production d'EnR et que le système de stockage est à la limite inférieure de sa capacité, toute la demande d'énergie sera satisfaite par le réseau. Ensuite, lorsque la capacité de stockage est supérieure à la consommation excédentaire non satisfaite par la production d'énergie renouvelable, une partie de la consommation correspondant à la limite de retrait du réseau sera réalisée au niveau du réseau, une autre partie sera réalisée au niveau de la production d'énergie renouvelable et la partie restante au niveau du système de stockage. Si la consommation excédentaire qui n'est pas retirée du réseau est inférieure à la production d'énergie renouvelable, une partie de cette production est utilisée pour satisfaire la consommation tandis qu'une autre partie sera utilisée pour charger le système de stockage. Si le système de stockage atteint sa limite de capacité supérieure, et qu'il reste une partie de la production d'EnR, cette EnR sera utilisée pour réduire l'extraction du réseau. La consommation au niveau du réseau devient nulle dans le cas où la production permet à la fois de charger le système de stockage et d'assurer pleinement la consommation. Il y aura même un excédent d'énergie dans les meilleures conditions de production. Pour la stratégie 1, il existe douze scénarios selon quatre paramètres de simulation numérique.

S'agissant de la stratégie 2, elle vise à contrôler les flux d'énergie et à maximiser l'utilisation des sources d'énergie renouvelable. La demande d'énergie est satisfaite en premier lieu par les sources d'énergie renouvelable lorsqu'elles sont disponibles, c'est pourquoi

le système de stockage n'est rechargé que lorsque la demande d'énergie est satisfaite. Le Tableau 5.2 présente les données relatives à la stratégie 2 et le schéma du processus de la stratégie 2 est présenté dans la Figure 5.6.

Tab. 5.2.: Liste des données nécessaires à la stratégie 2

Données d'entrées	SP	Système de production d'énergie renouvelables
	SC	Système de consommation
	P_ch	Charge maximale des batteries
	P_dech	Décharge maximale des batteries
Paramètres	rend_r	Rendement électrique du réseau
	rend_bat	Rendement des batteries
	rend_ond	Rendement de l'onduleur
	ond_out_max	Puissance maximale de sortie dans l'onduleur
	ond_in_max	Puissance maximale d'entrée dans l'onduleur
	LR	Limite réseau
	LH	Limite haute de stockage dans la batterie
	LB	Limite basse de stockage dans la batterie
	STOi-1	Situation de stockage dans la batterie à l'instant i
Données de sorties	RES	Puissance fournie par le réseau
	STO	Puissance provenant des batteries
	EXC1	Excédant d'électricité en courant continu produit avant le passage à l'onduleur
	EXC2	Excédant d'électricité en courant alternatif produit après le passage à l'onduleur

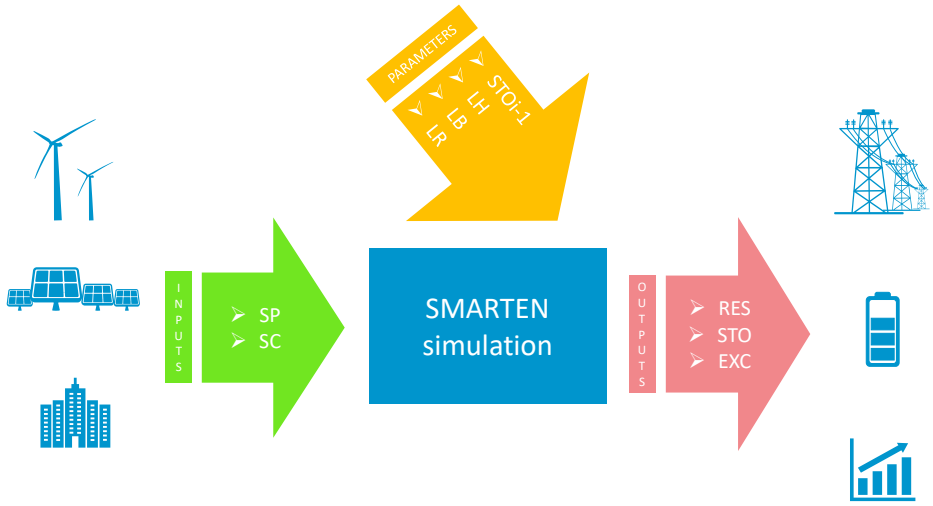

Fig. 5.6.: Schéma systémique du processus de la stratégie 2

L'algorithme de la stratégie 2 traite du système de production et du système de consommation, comme le fait la stratégie 1, mais cet algorithme prend également en compte la puissance maximale de charge de la batterie et la puissance maximale de décharge de la batterie pour décider de la manière dont l'énergie doit être extraite du réseau électrique ou du système de stockage et vérifier s'il y a une production d'énergie excédentaire. La simulation dépend également des paramètres importés, comme le fait la stratégie 1, mais il y a cinq paramètres supplémentaires par rapport au premier : le rendement du réseau électrique, le rendement de la batterie de stockage, le rendement du convertisseur, la puissance de sortie maximale du convertisseur et la puissance d'entrée maximale du convertisseur. Les Figures 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 montrent respectivement le diagramme prin-

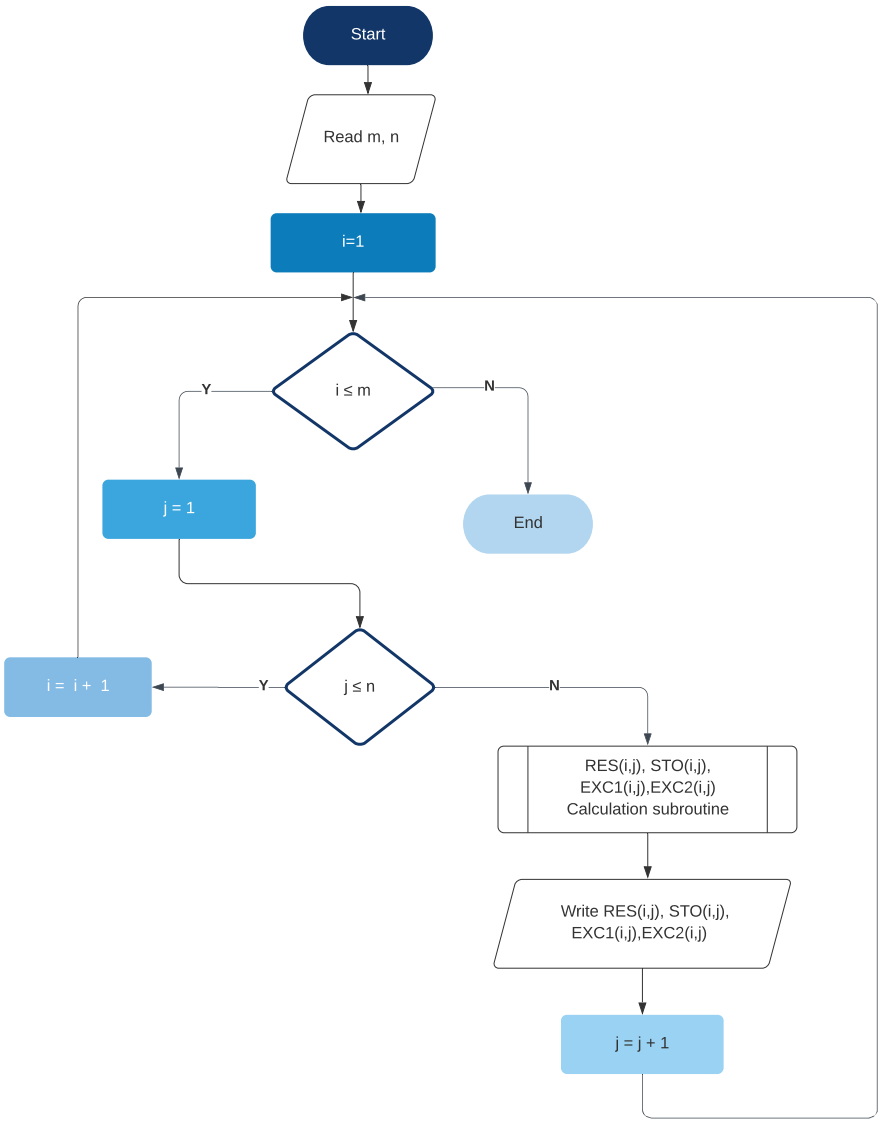

Fig. 5.7.: Organigramme de la stratégie 2

cipal de la stratégie 2 et le diagramme de la sous-routine de calcul. Ces organigrammes déterminent comment SMARTEN gère le flux d'énergie en fonction de chaque scénario.

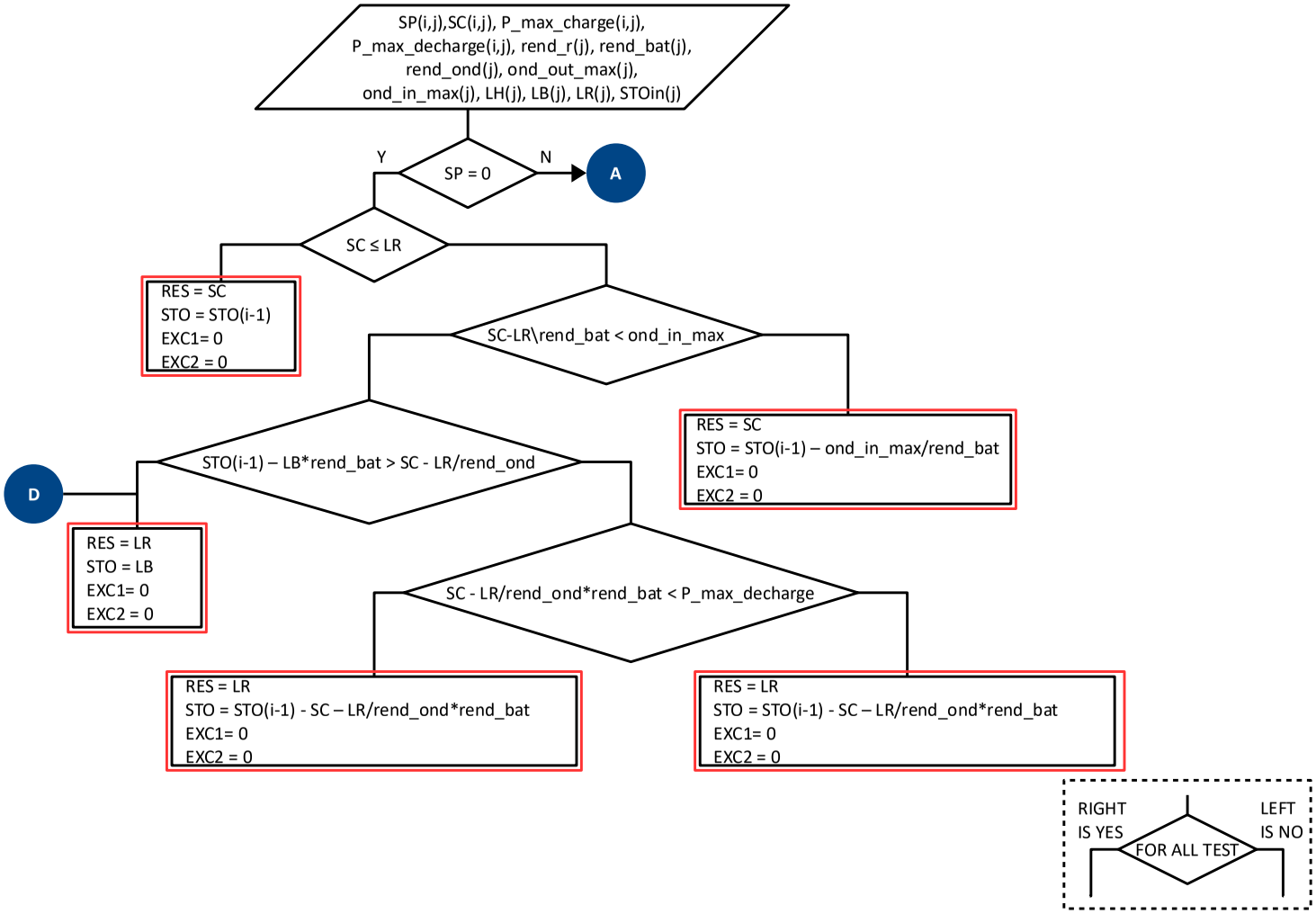

Fig. 5.8.: Organigramme du sous-programme de calcul de la stratégie 2 - Partie 1

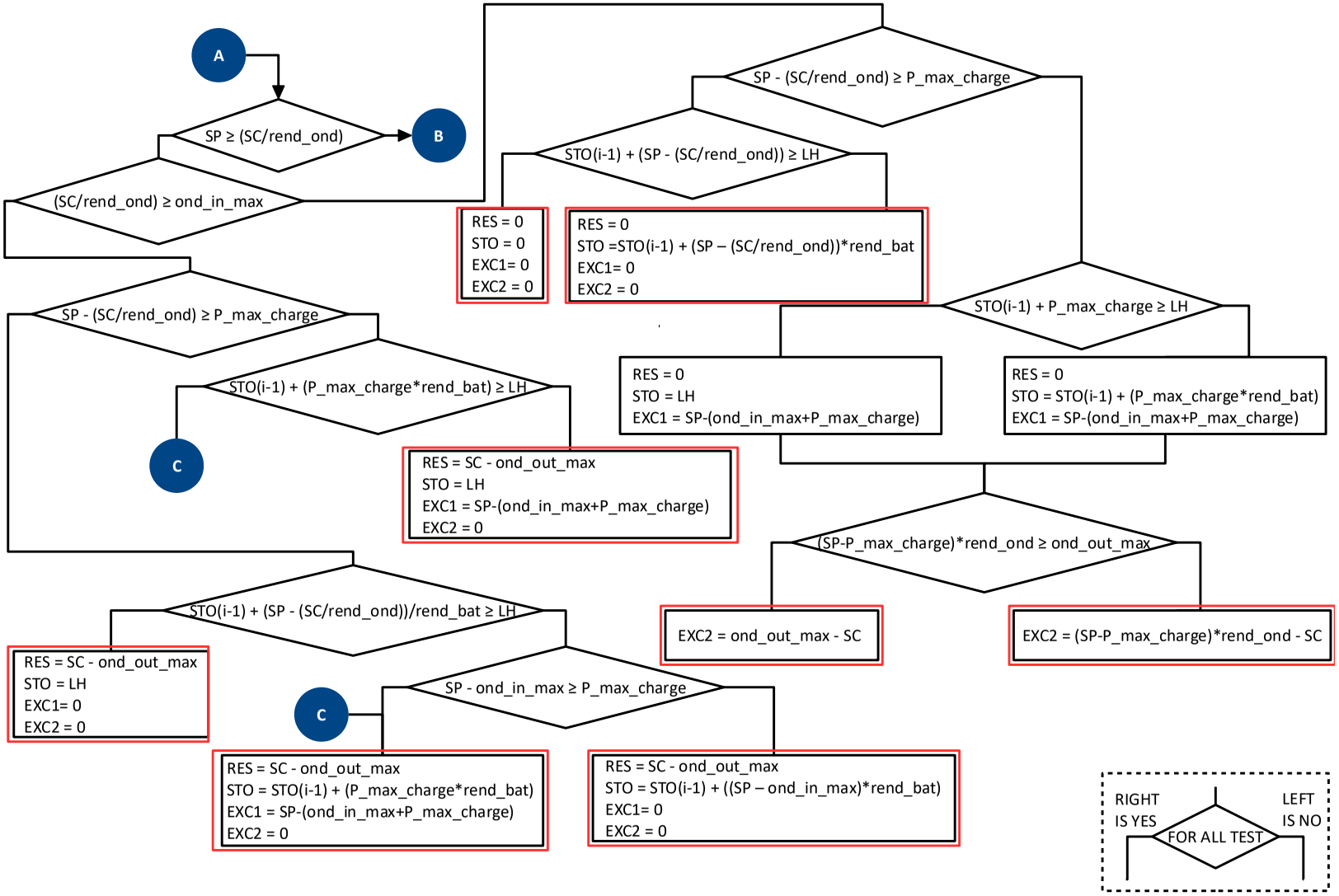

Fig. 5.9.: Organigramme du sous-programme de calcul de la stratégie 2 - Partie 2

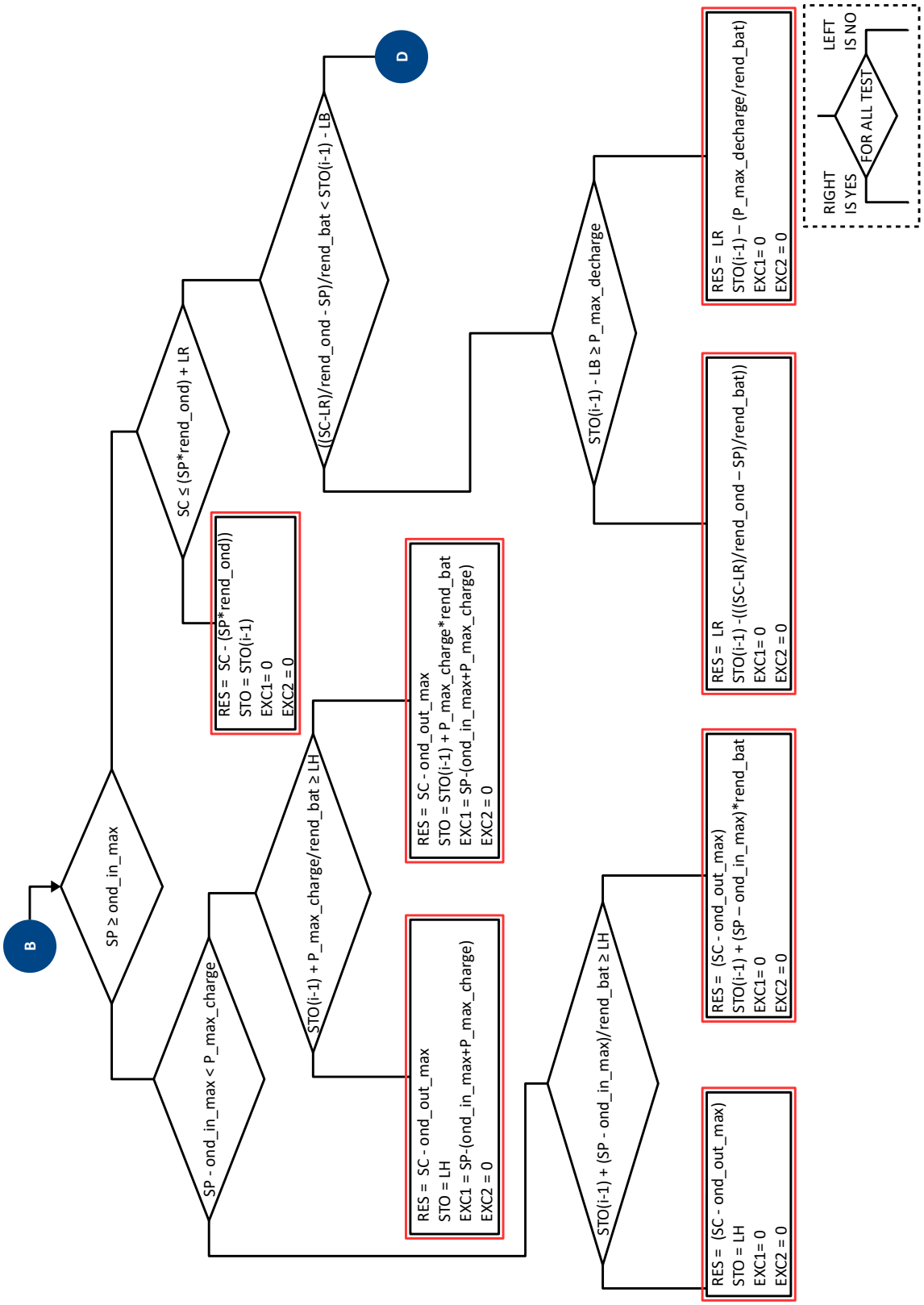

Fig. 5.10.: Organigramme du sous-programme de calcul de la stratégie 2 - Partie 3

L'approche logique de la stratégie 2 est basée sur la production d'EnR et il y a trois cas principaux :

— Cas 1 : il n'y a pas de production d'EnR ;

— Cas 2 : la production d'EnR peut satisfaire la demande d'énergie ;

— Cas 3 : la production d'EnR ne peut pas satisfaire la demande d'énergie.

Tout d'abord, s'il n'y a pas de production d'EnR, l'algorithme vérifie si la consommation d'énergie est inférieure à la limite de retrait du réseau. Cette demande d'énergie sera donc entièrement satisfaite par le réseau électrique. En revanche, si la demande d'énergie est supérieure à la limite de retrait du réseau, l'énergie sera extraite du réseau jusqu'à ce que cette limite soit atteinte. Ensuite, au-delà de cette limite, le reste de la demande d'énergie sera satisfait par le système de stockage. L'extraction de ce système de stockage dépend des paramètres de fonctionnement du convertisseur (efficacité, puissance d'entrée maximale, puissance de sortie maximale) et du dispositif de stockage (efficacité, puissance de charge maximale, puissance de décharge maximale, limite de capacité inférieure, limite de capacité supérieure, stockage pour le pas de temps précédent). Par exemple, lorsque l'énergie doit être extraite du système de stockage, l'algorithme vérifie si cette énergie requise est disponible dans le système de stockage et ne dépasse pas la puissance de sortie maximale du convertisseur. De plus, la demande d'énergie sera satisfaite à partir du système de stockage jusqu'à ce que sa limite inférieure de capacité soit atteinte. Au-delà de cette limite, le reste de cette demande d'énergie doit être finalement extrait du réseau.

Ensuite, s'il y a production d'EnR et que cette énergie est supérieure à la demande énergétique, l'algorithme vérifiera si les paramètres de fonctionnement peuvent permettre une extraction totale de cette source d'énergie EnR. Par conséquent, l'algorithme vérifiera si l'énergie requise est égale ou inférieure à la puissance de sortie maximale du convertisseur. Dans ce cas, la demande d'énergie sera satisfaite par la production d'EnR et la production excédentaire sera affectée au dispositif de stockage de charge. Ce processus de charge se poursuivra jusqu'à ce que la limite supérieure de capacité du dispositif de stockage soit atteinte. Toutefois, si la consommation dépasse la puissance de sortie maximale du convertisseur, le reste de la demande d'énergie sera satisfait par le réseau et le reste de la production d'EnR (au-delà de la puissance de sortie maximale du convertisseur) sera affecté à la charge du dispositif de stockage.

Enfin, s'il y a production d'EnR, mais que la demande d'énergie est supérieure à cette EnR, l'algorithme utilisera d'abord cette EnR et l'extraira ensuite du réseau électrique. Ainsi, la consommation sera satisfaite par le réseau au-delà de la production d'EnR. Mais si l'énergie extraite du réseau électrique dépasse la limite de prélèvement du réseau, l'algorithme vérifiera la situation du système de stockage. Si la capacité de ce système de stockage est supérieure à sa limite inférieure de capacité, ce système de stockage compensera l'extraction du réseau au-delà de la limite de retrait du réseau. De la même

manière, l'algorithme s'assurera que l'extraction de l'EnR ne dépasse pas la puissance de sortie maximale du convertisseur. Si la production d'EnR dépasse la puissance d'entrée maximale du convertisseur, l'algorithme affectera l'excès d'EnR en courant continu pour charger le système de stockage. Ce système de stockage sera ainsi chargé jusqu'à ce que sa limite de capacité supérieure soit atteinte, en fonction de la disponibilité de l'excédent d'EnR en courant continu. Pour résumer, l'algorithme de gestion de la stratégie 2 extrait d'abord de la production d'EnR, puis du réseau électrique et enfin du système de stockage. Ce système de stockage ne sera chargé que si la demande d'énergie est satisfaite. Il existe vingt scénarios selon la stratégie 2.

5.4 Résultats des travaux scientifiques réalisés

Afin de vérifier la fiabilité de SMARTEN, une validation par comparaison avec un autre outil est nécessaire [B12]. Le choix du logiciel pour effectuer la comparaison est basé sur ce qui est communément utilisé dans la recherche et accepté par la communauté des chercheurs. Ainsi, le logiciel HOMER a été sélectionné pour effectuer cette comparaison. HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) a été développé à l'origine au National Renewable Energy Laboratory (NREL, USA) [Noa]. Ce logiciel peut être utilisé pour des systèmes autonomes ou des systèmes connectés à un micro-réseau. En outre, HOMER est un outil utilisé pour aider à la conception, au dimensionnement, à l'optimisation et à la simulation de systèmes hybrides d'énergie renouvelable et est largement utilisé par les chercheurs pour effectuer des simulations sur une nouvelle configuration de systèmes d'énergie renouvelable [PSS13], [Zah+16], [KJC17]. HOMER propose différentes configurations aux utilisateurs en fonction de leur objectif.

Pour le test de fiabilité, nous avons chargé dans SMARTEN et HOMER les mêmes données relatives à quatre bâtiments : trois bâtiments résidentiels et un bâtiment commercial. Le système de production (SP) utilisé pour la simulation est une production d'énergie solaire par des panneaux photovoltaïques. Le système de stockage utilisé pour la simulation est constitué de batteries. La production d'énergie renouvelable est fournie par la base de données annuelles de la NASA dans l'état du Colorado aux États-Unis, du 1er janvier à 00h00 au 31 décembre 2007 à 23h00, ce qui correspond à 8760 heures de simulation.

Les paramètres de la simulation sont indiqués dans le Tableau 5.3 et le rendement du système de grille est supposé être de 0,80. Pour la description des paramètres : ηbat se réfère au rendement de l'accumulateur, $\eta conv$ se réfère au rendement du convertisseur, Max conv. output pour la puissance de sortie maximale du convertisseur, Max conv. input pour la puissance d'entrée maximale du convertisseur, LR pour la limite de retrait du réseau, LH pour la limite supérieure de la capacité de stockage, LB pour la limite inférieure de la capacité de stockage, STOi-1 pour la situation de stockage pour le pas

de temps précédent. Les valeurs de l'efficacité des batteries et du convertisseur sont nécessaires pour la comparaison et la stratégie de HOMER est plus proche de la stratégie 2 de SMARTEN, donc la stratégie 2 de SMARTEN a été utilisée pour cette comparaison.

Tab. 5.3.: Les paramètres de la simulation dans SMARTEN

Building	ηbat	$\eta conv$	Max conv. output (kW)	Max conv. input (kW)	LR (kWh)	LH (kWh)	LB (kWh)	STOi-1 (kWh)
Residential 1	0.89	0.95	1.22	1.29	1.50	5.00	2.00	5.00
Residential 2	0.89	0.95	0.48	0.51	1.50	2.00	0.80	2.00
Commercial	0.89	0.95	137.72	144.97	255.00	379.30	151.72	379.30
Residential 4	0.89	0.95	2.59	2.72	1.50	11.01	4.40	11.01

La Figure 5.11 montre un exemple de graphique de la variation des données par SMARTEN graph pour le bâtiment résidentiel 2 du 1er janvier 2007 à 01 h 00 mn au 2 janvier 2007 à 00 h 00 mn, donc pour 24 heures de simulation. L'approche de gestion de la stratégie 2 consiste à maximiser l'utilisation des énergies renouvelables. Par conséquent, de 06h 00 mn à 18h 00 mn, toute la production d'EnR est attribuée à la minimisation de l'extraction du réseau. Pendant le pic de consommation (à 19h 00 mn), la demande d'énergie au-delà de la limite de retrait du réseau est satisfaite par le système de stockage.

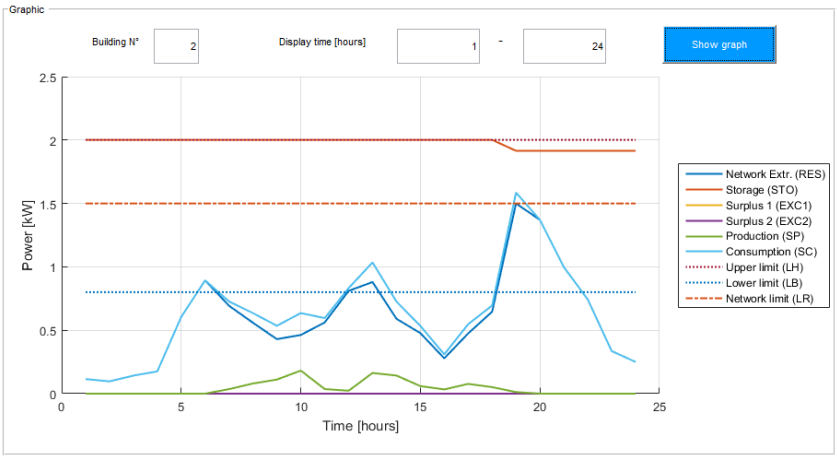

Fig. 5.11.: Variation des données sur SMARTEN

Un avantage de SMARTEN par rapport à HOMER est que la simulation pour les quatre bâtiments est faite simultanément alors que sur HOMER, la simulation a été réalisée bâtiment par bâtiment. C'est l'aspect multi-échelle de SMARTEN. Ainsi, cet aspect multi-échelle permet la distribution des flux de mélange d'énergie dans les bâtiments connectés de l'environnement simulé.

Les Figures 5.12 et 5.13 montrent respectivement la variation du système de stockage pour une année de simulation et la variation de l'extraction du réseau du 20 octobre 2007 à 00 h 00 mn au 10 novembre 2007 à 23 h 00 mn pour le bâtiment résidentiel 1. Sur le deuxième axe des ordonnées, ces chiffres montrent l'erreur relative entre SMARTEN et HOMER pour ces variations. Cette plage de temps est choisie pour la Figure 5.13

afin de permettre une meilleure visualisation de l'erreur maximale dans la variation de l'extraction de la grille.

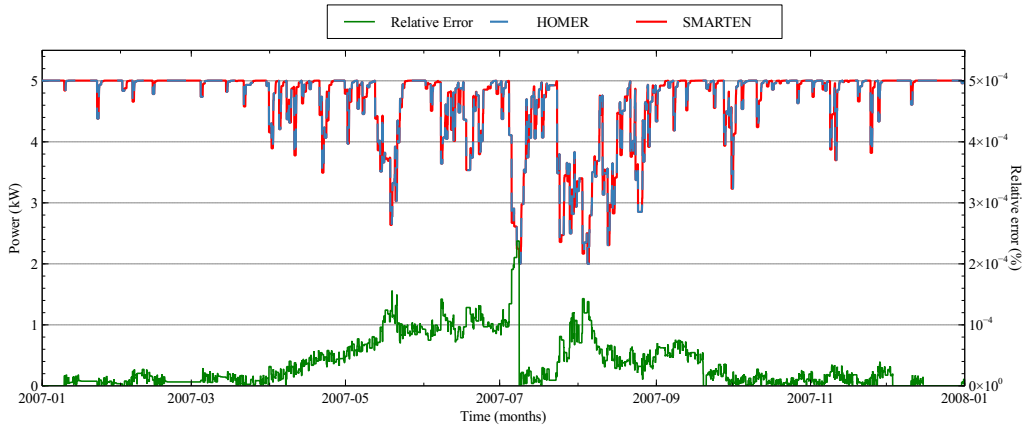

Fig. 5.12.: Variation du système de stockage et erreur relative pour le bâtiment résidentiel 1

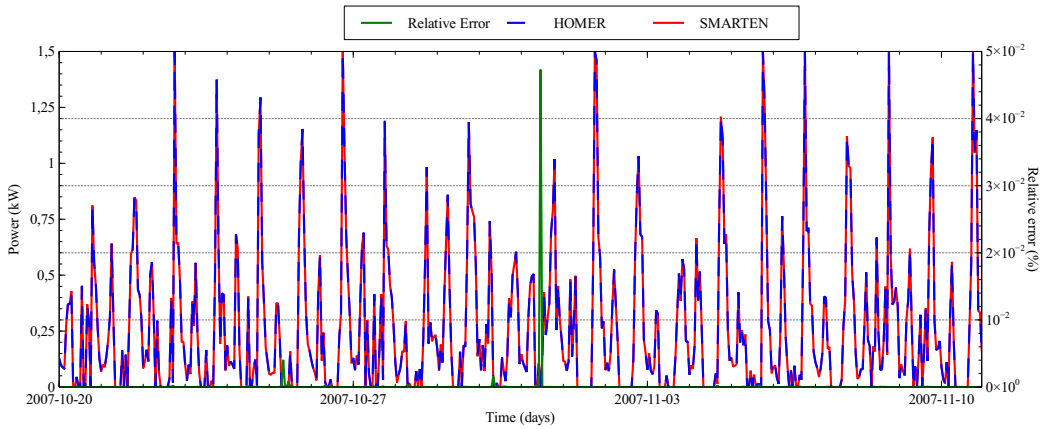

Fig. 5.13.: Variation de l'extraction du réseau et erreur relative pour le bâtiment résidentiel 1

Comme le montre la Figure 5.12, où l'erreur relative maximale sur le système de stockage est trouvée pendant toute la simulation, la différence entre SMARTEN et HOMER est très proche. L'erreur maximale est observée le 07 juillet 2007 à 19 h 00 mn. Elle correspond à une différence de puissance d'environ 5,34W, ce qui correspond à une erreur relative de 2.4x10^{-4}%. Pour le bâtiment résidentiel 1, la limite de retrait du réseau est d'environ 1.5 kWh et la différence de puissance entre HOMER et SMARTEN est d'environ 5.34 W, par conséquent, la différence de puissance par rapport à la limite de retrait du réseau est négligeable (3.56x10^{-2}%).

Les figures 5.14 et 5.15 montrent respectivement la variation du système de stockage pour une année de simulation et la variation du prélèvement sur le réseau du 1er janvier 2007 à 00 h 00 mn au 20 janvier 2007 à 23 h 00 mn pour Commercial Building. Sur le deuxième axe des ordonnées, ces chiffres montrent l'erreur relative entre SMARTEN et HOMER pour ces variations. Cette plage de temps est choisie pour la Figure 5.15 afin de permettre une meilleure visualisation de l'erreur maximale dans la variation de l'extraction de la grille.

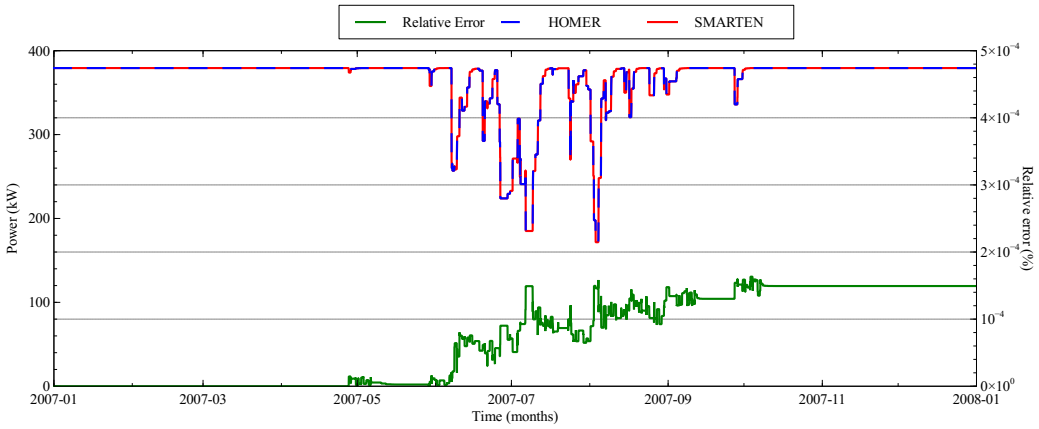

Fig. 5.14.: Variation du système de stockage et erreur relative pour Bâtiment commercial

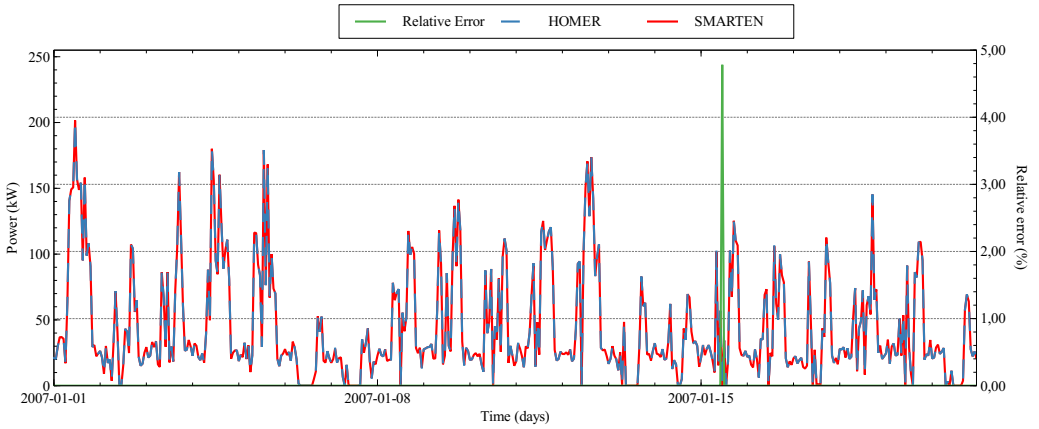

Fig. 5.15.: Variation de l'extraction de la grille et erreur relative pour Bâtiment commercial

La Figure 5.15 montre que la simulation de gestion générale proposée dans les algorithmes SMARTEN (en particulier avec la stratégie 2) est très similaire à la gestion du logiciel HOMER. L'erreur maximale entre SMARTEN et HOMER correspond à une différence de puissance d'environ 45.2 W, donc la valeur maximale de l'erreur relative est de 4.78%. Pour le bâtiment commercial, la limite de retrait du réseau est d'environ 255 kWh et la différence de puissance entre HOMER et SMARTEN est d'environ 5,34W. Par conséquent, la différence de puissance par rapport à la limite de retrait du réseau est négligeable (1.77×10^{-2}%). Les différences entre les bâtiments résidentiels et commerciaux sont la capacité du système de stockage, les propriétés du convertisseur et la limite de retrait du réseau. Ces paramètres contribuent à une erreur relative plus élevée pour la simulation d'un bâtiment commercial par rapport à un bâtiment résidentiel.

Enfin, les valeurs d'erreur maximales pour les simulations de ces quatre bâtiments sont résumées dans le Tableau 5.4. De très petites erreurs d'environ 2×10^{-4}% sont constatées pour la gestion des systèmes de stockage et des erreurs ne dépassant pas 5 % pour la gestion de l'extraction du réseau. Ces résultats de comparaison indiquent le degré de fiabilité de SMARTEN pour gérer le bouquet énergétique dans un environnement de réseau intelligent.

Tab. 5.4.: Erreurs relatives commises par SMARTEN par rapport au logiciel de simulation HOMER pour la gestion du mix énergétique dans un bâtiment

	Erreur relative (%)	
Bâtiment	Réseau	Stockage
Résidentiel 1	$4.73x10^{-2}$	$2.40x10^{-4}$
Résidentiel 2	1.39	$1.50x10^{-4}$
Commercial	4.78	$1.60x10^{-4}$
Résidentiel 3	$2.54x10^{-2}$	$8.00x10^{-5}$

Lors de la simulation de la gestion du mix énergétique de quatre bâtiments, les résultats obtenus par SMARTEN diffèrent de ceux de HOMER d'environ $2x10^{-4}$% pour la puissance extraite des batteries de stockage et d'environ 4,78% pour la puissance retirée du réseau. Ce test de fiabilité, par comparaison, montre que les résultats obtenus par SMARTEN concordent avec ceux obtenus par le logiciel HOMER autant dans la gestion des systèmes de stockage que dans la gestion de l'extraction du réseau.

La principale différence avec les simulations effectuées dans SMARTEN et HOMER est l'aspect multi-échelle. Dans HOMER, la simulation de plusieurs bâtiments est laborieuse car chaque bâtiment est simulé un par un. Pour faire fonctionner les trois bâtiments résidentiels et le bâtiment commercial, il faut charger quatre fois des données et des paramètres d'entrée différents. Dans SMARTEN, la simulation de ces quatre bâtiments est réalisée simultanément. Un gain de temps et de manipulation est donc observé lors de l'utilisation de SMARTEN. En outre, la simulation simultanée de plusieurs bâtiments permettra de répartir les flux de mélange énergétique entre les bâtiments connectés de l'environnement simulé.

Les algorithmes de la stratégie 1 et de la stratégie 2 sont codés dans une interface utilisateur graphique (GUI) (voir Figure 5.16). L'interface graphique a été conçue sous une version 64bits de Windows et MATLAB 2015b afin de permettre un calcul fluide de matrices plus grandes. Le principal avantage de SMARTEN est la possibilité d'avoir une visualisation en 2D du système d'environnement bâti, du quartier, de la ville, de la commune ou du pays. Cette possibilité de visualisation en 2D est un atout très important pour l'outil d'aide à la décision. Grâce à cette visualisation 2D, le décideur peut visualiser directement l'emplacement du bâtiment qui consomme le plus, celui qui produit le plus d'énergie. L'utilisateur peut aussi localiser le lieu où la demande en énergie est la plus plus élevée, où devrait être implanté un nouveau système d'énergie renouvelable, où devrait être implanté un nouveau système de stockage par rapport aux espaces indiqués dans la visualisation 2D que propose SMARTEN.

Ainsi, les utilisateurs peuvent prendre une décision en prenant en considération simultanément l'espace et le temps dans lesquels devra évoluer le système a étudier [A05]. L'objectif final de cette étude a été de proposer un nouvel outil d'aide à la décision basé

sur de nouveaux algorithmes de pilotage du mix énergétique suivant de multiples échelles d'étude (c.à.d. au niveau d'un bâtiment, d'un espace bâti, d'un quartier, d'une ville voire d'un pays ou continent en régime dynamique dans l'espace et le temps).

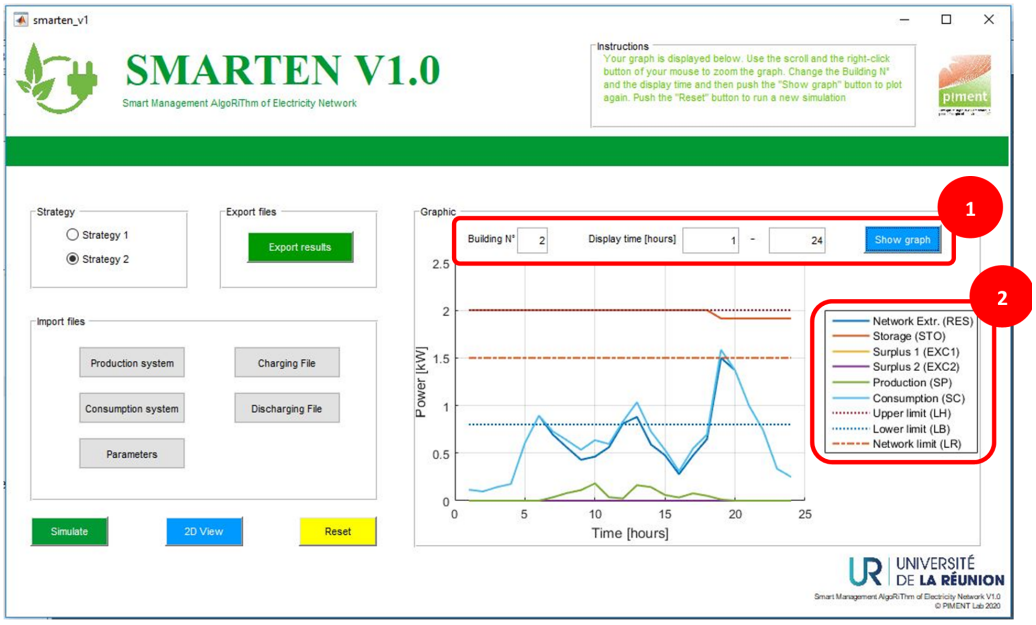

Fig. 5.16.: Représentation graphique de SMARTEN : fenêtre principale

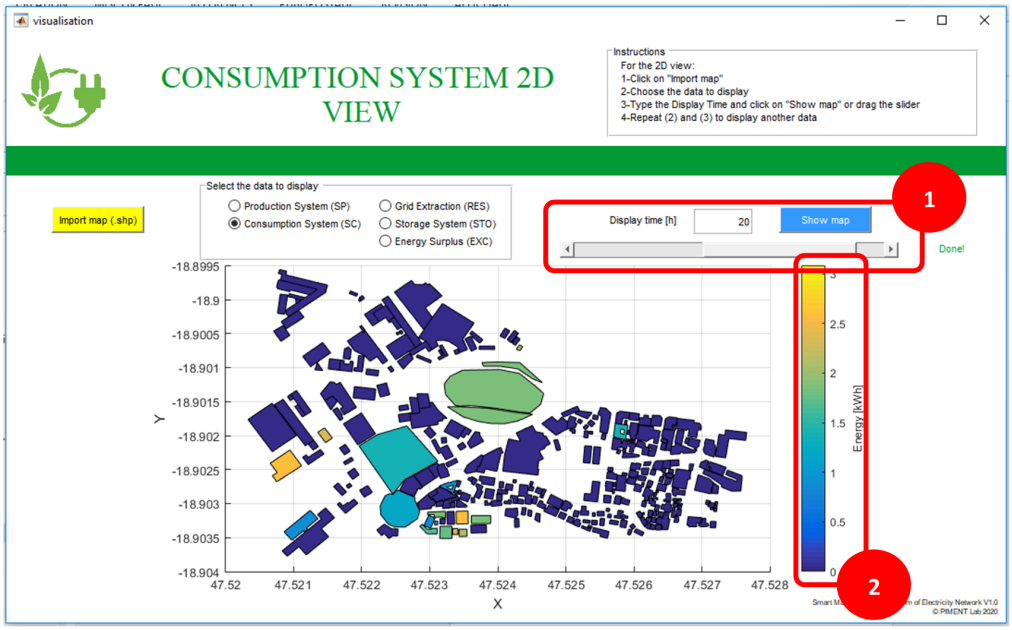

Fig. 5.17.: Visualisation 2D sous SMARTEN

5.5 Publications, projets/financements et brevet associés au sujet 3

- Revues spécialisées avec comité de lecture (2) :

1. [$A05$] : A. N A. Randriantsoa, **D. Fakra**, M. P. Ranjaranimaro, M. N. M. Rachadi, J. C. Gatina, New Management Algorithms for Smart Electricity Network : Designing and Working Principles, Proceeding in Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC), Springer, (accepté)
2. [$B12$] : M. N. Mohamed Rachadi, A. N. A. Randriantsoa, **D. A. H. Fakra**, M. P. Ranjaranimaro, J. C. Gatina, SMARTEN V1.0 : a multiscale tool for simulating the management of smart grid - Reliability tests by comparison with HOMER software. (Article soumis le 29/08/20)

- Congrès/Colloques avec actes publiés (2) :
  1. [$C19$] : **D. Fakra**, M. P. Ranjaranimaro, M. Nasroudine, J. C. Gatina, A new algorithm management approach of house electrical smart grid and reliability test of the scenarios with Homer software, 12th Internationnal Conference on Sustainable Energy Environmental Protection (SEEP 2019), 18-21 November, University of Sharjah, UAE, 2019 (Reférence de l'article publié dans le proceeding de la conférence : SEEP10107).
  2. [$C20$] : M. N. Mohamed Rachadi, D. A. S. Andriatoavina, **D. Fakra**, M. P. Ranjaranimaro, J. C. Gatina, A multi-scale calculation tool for the management of mixed electrical energy flows, 12th Internationnal Conference on Sustainable Energy Environmental Protection (SEEP 2019), 18-21 November, University of Sharjah, UAE, 2019 (Reférence de l'article publié dans le proceeding de la conférence : SEEP10142).
- Thèses (2) :
  1. [NID18] : Elassad NIDHOIMI, Description et analyse du fonctionnement des espaces bâtis à Mayotte. Mise en œuvre systématique de bilan carbone, Soutenue le 19 juillet 2018 à l'Université de la Réunion, Directeur de thèse : Pr. Jean Claude GATINA. 277 pages. (co-encadrement : 40%)
  2. [RAN19] : Manitra Pierrot RANJARANIMARO, Evaluation de la qualité environnementale, du fonctionnement énergétique des espaces batis à Madagascar, Soutenue le 28 février 2019 à l'université d'Antsiranana, thèse en cotutelle entre l'université de La Réunion et l'université d'Antsiranana. Directeur de thèse : Pr. jean Claude GATINA et Co-Directeur : Pr. Jean Marie RAZAFIMAHENINA. 245 pages. (co-encadrement : 30%)
- Autres : documents internes, fascicules, rapports, etc.(4) :
  1. [$Document3$] : A. N A. Randriantsoa, **D. A. H. Fakra**, Manuel d'utilisation du logiciel SMARTEN, Version Française, 29 pages, Fascicule interne publié le 16/01/20.
  2. [$Document4$] : A. N A. Randriantsoa, **D. A. H. Fakra**, Instruction manual of SMARTEN software, English version, 29 pages, Intern reports published the 16/01/20.

3. [*Document*5] : A. N A. Randriantsoa, Titre : Création d'une interface graphique dédiée à un code de calcul du pilotage d'un mix énergétique dans le réseau électrique multi-échelle, Stage de recherche de 6 mois (niveau Ingénieur) soutenu le 29 mai 2020 à l'IST d'Antananarivo, mobilité ERASMUS+, Encadrement : 100%.
4. [*Document*6] : Mohamed Nasroudine Mohamed RACHADI, Titre : Mise en place d'un outil de pilotage des flux et mix énergétique d'un espace bâti ou système bâti, stage de recherche (6 mois) soutenu le 14 septembre 2018. Université de La Lorraine, encadrement : 100%.

Sélection synthétique de la bibliographie sur le sujet 3 : logiciel SMARTEN

[AL11] Vetter M Lippkau A Mauch K ARRIBAS L Bopp G. *World-wide overview of design and simulation tools for hybrid PV systems.* 2011 (cf. p. 44).

[Asc+16] Fabrizio ASCIONE, Nicola BIANCO, Rosa Francesca De MASI et al. „Multi-objective optimization of the renewable energy mix for a building“. In : *Applied Thermal Engineering* 101 (2016), p. 612 -621 (cf. p. 43).

[Chr16] Konstantina CHRISTAKOU. „A unified control strategy for active distribution networks via demand response and distributed energy storage systems“. In : *Sustainable Energy, Grids and Networks* 6 (2016), p. 1 -6 (cf. p. 45).

[Con+10] D. CONNOLLY, H. LUND, B.V. MATHIESEN et M. LEAHY. „A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems“. In : *Applied Energy* 87.4 (2010), p. 1059 -1082 (cf. p. 43).

[CW17] G.Q. CHEN et X.F. WU. „Energy overview for globalized world economy : Source, supply chain and sink“. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (2017), p. 735 -749 (cf. p. 42).

[Dil20] G. DILEEP. „A survey on smart grid technologies and applications“. In : *Renewable Energy* 146 (2020), p. 2589 -2625 (cf. p. 42).

[Edi19] Volkan Ş. EDIGER. „An integrated review and analysis of multi-energy transition from fossil fuels to renewables“. In : *Energy Procedia* 156 (2019). 5th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2018), p. 2 -6 (cf. p. 42).

[Fai+18] Mohammad FAISAL, Mahammad A. HANNAN, Pin Jern KER et al. „Review of Energy Storage System Technologies in Microgrid Applications : Issues and Challenges“. In : *IEEE Access* 6 (2018), p. 35143-35164 (cf. p. 45).

[FHA11] Dean FANTAZZINI, Mikael HÖÖK et André ANGELANTONI. „Global oil risks in the early 21st century“. In : *Energy Policy* 39.12 (2011). Clean Cooking Fuels and Technologies in Developing Economies, p. 7865 -7873 (cf. p. 42).

[Gie+19] Dolf GIELEN, Francisco BOSHELL, Deger SAYGIN et al. „The role of renewable energy in the global energy transformation“. In : *Energy Strategy Reviews* 24 (2019), p. 38 -50 (cf. p. 42).

[Ker+16] Thongchart KERDPHOL, Kiyotaka FUJI, Yasunori MITANI, Masayuki WATANABE et Yaser QUDAIH. „Optimization of a battery energy storage system using particle swarm optimization for stand-alone microgrids“. In : *International Journal of Electrical Power Energy Systems* 81 (2016), p. 32 -39 (cf. p. 45).

[KJC17] Insu KIM, Jean-Ann JAMES et John CRITTENDEN. „The case study of combined cooling heat and power and photovoltaic systems for building customers using HOMER software“. In : *Electric Power Systems Research* 143 (2017), p. 490 -502 (cf. p. 58).

[LZ19] Timo LEHTOLA et Ahmad ZAHEDI. „Solar energy and wind power supply supported by storage technology : A review“. In : *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 35 (2019), p. 25 -31 (cf. p. 42).

[MDT11] Daniel Studer Kyle Benne Brent Griffith MICHAEL DERU Kristin Field et Paul TORCELLINI. „Commercial Reference Building Models of the National Building Stock“. In : *National Renewable Energy Laboratory* (2011) (cf. p. 45).

[Men+19] Isaac Adjei MENSAH, Mei SUN, Cuixia GAO et al. „Analysis on the nexus of economic growth, fossil fuel energy consumption, CO2 emissions and oil price in Africa based on a PMG panel ARDL approach“. In : *Journal of Cleaner Production* 228 (2019), p. 161 -174 (cf. p. 42).

[MFS18] Florinda MARTINS, Carlos FELGUEIRAS et Miroslava SMITKOVÁ. „Fossil fuel energy consumption in European countries“. In : *Energy Procedia* 153 (2018). 5th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2018, 23-27 July 2018, Prague, Czech Republic, p. 107 -111 (cf. p. 42).

[MFW18] Ming MENG, Yanan FU et Xinfang WANG. „Decoupling, decomposition and forecasting analysis of China's fossil energy consumption from industrial output“. In : *Journal of Cleaner Production* 177 (2018), p. 752 -759 (cf. p. 42).

[NID18] Elassad NIDHOIMI. „Description et analyse du fonctionnement des espaces bâtis à Mayotte. Mise en œuvre systématique de bilan carbone“. Doctorat. Réunion : Université de La Réunion, 2018 (cf. p. 42, 64).

[Noa] *HOMER - Hybrid Renewable and Distributed Generation System Design Software*. 2020-01-08. URL : `https://www.homerenergy.com/` (visité le 8 jan. 2020) (cf. p. 58).

[NRR14] Anh-Tuan NGUYEN, Sigrid REITER et Philippe RIGO. „A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis“. In : *Applied Energy* 113 (2014), p. 1043 -1058 (cf. p. 43, 44).

[PK16] Omid PALIZBAN et Kimmo KAUHANIEMI. „Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications“. In : *Journal of Energy Storage* 6 (2016), p. 248 -259 (cf. p. 45).

[PSS13] Igib PRASETYANINGSARI, Agus SETIAWAN et Ahmad Agus SETIAWAN. „Design Optimization of Solar Powered Aeration System for Fish Pond in Sleman Regency, Yogyakarta by HOMER Software“. In : *Energy Procedia* 32 (2013). International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA) 2012, p. 90 -98 (cf. p. 58).

[RAN19] Manitra Pierrot RANJARANIMARO. „Evaluation de la qualité environnementale, du fonctionnement énergétique des espaces batis à Madagascar“. Doctorat. Réunion : Université de La Réunion, 2019 (cf. p. 42, 64).

[SC14] Sunanda SINHA et S.S. CHANDEL. „Review of software tools for hybrid renewable energy systems“. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (2014), p. 192 -205 (cf. p. 43).

[SHC18] Maria-Angeles SANCHEZ-HIDALGO et Maria-Dolores CANO. „A survey on visual data representation for smart grids control and monitoring“. In : *Sustainable Energy, Grids and Networks* 16 (2018), p. 351 -369 (cf. p. 43).

[Sma] *What does the smart grid do ?* 7th January 2020 (cf. p. 43).

[Suk+17] Shivashankar SUKUMAR, Hazlie MOKHLIS, Saad MEKHILEF, Kanendra NAIDU et Mazaher KARIMI. „Mix-mode energy management strategy and battery sizing for economic operation of grid-tied microgrid“. In : *Energy* 118 (2017), p. 1322 -1333 (cf. p. 43).

[Tra17] Ted TRAINER. „Some problems in storing renewable energy“. In : *Energy Policy* 110 (2017), p. 386 -393 (cf. p. 42).

[TRS01] Dave TURCOTTE, Michael ROSS et Farah SHERIFF. „PHOTOVOLTAIC HYBRID SYSTEM SIZING AND SIMULATION TOOLS : STATUS AND NEEDS“. In : (2001), p. 11 (cf. p. 43, 44).

[Wor+19] Imane WORIGHI, Abdelilah MAACH, Abdelhakim HAFID, Omar HEGAZY et Joeri Van MIERLO. „Integrating renewable energy in smart grid system : Architecture, virtualization and analysis“. In : *Sustainable Energy, Grids and Networks* 18 (2019), p. 100226 (cf. p. 43).

[YS05] Runming YAO et Koen STEEMERS. „A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK“. In : *Energy and Buildings* 37.6 (2005), p. 663 -671 (cf. p. 45).

[Zah+16] Hassan ZAHBOUNE, Smail ZOUGGAR, Goran KRAJACIC et al. „Optimal hybrid renewable energy design in autonomous system using Modified Electric System Cascade Analysis and Homer software“. In : *Energy Conversion and Management* 126 (2016), p. 909 -922 (cf. p. 58).

6

Métrologie low-cost sur la caractérisation des propriétés thermo-optico-physiques des matériaux de construction innovants (nouvelle génération)

Ces travaux sont les fruits d'échanges d'étudiants entre l'université de la Réunion et l'université de Grenade en Espagne sur des projets de mobilités ERASMUS. Un brevet [Brevet1] a été déposé dans le cadre de ces études, complété par deux articles [B07] et [B09]. L'originalité du nouveau dispositif expérimental conçu par le laboratoire PIMENT et qui sera présenté dans ce sous-chapitre repose sur sa capacité à caractériser les coefficients de conductivité thermique, de réflectance optique, d'absorptance optique et de transmittance optique d'un matériau de construction quelconque qui n'est ni opaque ni transparent.

Table des matières du chapitre 6

6.1 Contexte et problématique scientifique 72

6.2 Présentation du dispositif expérimental McM (Multi-Coef-Meter) developpé et des modèles associés 73

6.2.1 Protocole en lien avec la mesure de la conductivité thermique . . 79

6.2.2 Protocole en lien avec les mesures simultanées de l'absorptance, la réflectance et la transmittance optique 80

6.3 Résultats des travaux scientifiques réalisés 81

6.4 Publications, projets/financements et brevet associés au sujet 4 85

Sélection synthétique de la bibliographie sur le sujet 4 : le Multi-Coef-mètre (McM) 87

6.1 Contexte et problématique scientifique

De nos jours, on voit apparaître de plus en plus de nouveaux types de matériaux de construction. La technologie actuelle et les avancées dans le domaine de l'innovation permettent en effet de concevoir de nouvelles générations de parois, de vitrages, de toitures, de routes, de ponts et de chaussées nécessitant des études de caractérisation plus adaptées. Ces matériaux ont des propriétés qui peuvent être difficilement mesurées et/ou modélisées. C'est ainsi, par exemple, qu'il est très difficile de caractériser (par des mesures) les propriétés thermo-physiques d'un matériau translucide. Nous avons également le cas des matériaux à changement de phase (MCP) ou encore les matériaux dits Produits Mince Réfléchissants (PMR), pour ne citer que ceux-là. A cela s'ajoute le souci de vouloir déterminer les caractéristiques optiques de ces matériaux innovants afin de nous assurer d'un confort visuel adapté en fonction du type de bâtiment qui doit être construit, de l'orientation de ce bâtiment ainsi que des contraintes architecturales de chacun d'eux. De nouvelles techniques de mesure doivent donc être proposées pour répondre à l'étude de ces nouveaux types de matériaux en constante évolution et qui rendent par moment les protocoles expérimentaux existants obsolètes.

Les travaux menés ici traitent essentiellement des matériaux translucides. Ces matériaux ne sont ni opaques ni transparents et rendent donc difficiles les mesures de caractérisation thermo-optico-physique de ces derniers. C'est notamment le cas si l'on souhaite connaître la valeur de la constante de conductivité thermique ainsi que celle de la transmittance, la réflectance et l'absorptance optiques du matériau en question.

En effet, il est vrai que la loi de Fourier en régime permanent suffit pour décrire parfaitement la constante de conductivité thermique dans une expérimentation. Cette loi est donnée, en régime permanent, par (voir [VH04] et [AST13a]) :

$$q_c = -k.gradT = -k\frac{T_2 - T_1}{L} \tag{6.1}$$

De même que, dans une expérimentation, les valeurs obtenues par des mesures des constantes optiques sont généralement définies par le rapport entre les flux optiques transmis, réfléchis ou absorbés du matériau et le flux lumineux incident provenant d'une source lumineuse. Ces valeurs sont donc données par les relations suivantes [AST12a] :

$$\rho = \frac{\phi_\rho}{\phi_i} \tag{6.2}$$

$$\tau = \frac{\phi_\tau}{\phi_i} \tag{6.3}$$

$$\alpha = \frac{\phi_\alpha}{\phi_i} \tag{6.4}$$

Cependant, prendre des mesures de ces constantes avec les techniques et appareils existants de nos jours n'est pas aisé. D'une part parce que ces appareils coûtent relativement cher, d'autre part parce qu'ils sont limités à des mesures de matériaux uniquement opaques ou transparents. A cela s'ajoute la contrainte de la durée de mesure relativement longue. Des pistes de mesure à partir de théories sur des sphères intégrantes existent [Par+07], mais doivent être améliorées afin de prendre en compte les matériaux de construction innovants. Cette amélioration doit tenir compte du coût de fabrication du dispositif sans que cela n'ait un impact sur la qualité et la pertinence des mesures obtenues. Il faut également trouver le moyen de réduire le temps mis pour effectuer ces mesures, voire de pouvoir récolter toutes les valeurs de mesure simultanément si possible.

6.2 Présentation du dispositif expérimental McM (Multi-Coef-Meter) developpé et des modèles associés

Nous avons proposé une nouvelle méthode simplifiée de mesure de ces propriétés thermo-optico-physiques [*B*07]. Cette méthode est basée sur deux principes : la théorie de Kulbelka-Munk pour la mesure de la transmittance, l'absorptance et la réflectance optique du matériau translucide; puis la méthode classique du flux permanent pour la mesure de la conductivité thermique de ce dernier. Pour cela, nous avons proposé un nouveau dispositif expérimental à moindre coût, inspiré des systèmes dits à "sphère intégrante", qui permet de mesurer ces quatre propriétés thermo-physiques en même temps.

Le matériel utilisé pour concevoir le prototype expérimental est le suivant (voir Figure 6.4) :

- un pointeur laser monochromatique d'une puissance de 200 mW (classe 3B) d'une longueur d'onde d'environ 650 nm et pouvant avoir une portée de plus de 1000 m dans le noir;

- deux sphères identiques de 30 cm de diamètre. La surface intérieure de la sphère est peinte en blanc afin d'augmenter le coefficient de réflexion de la paroi vis-à-vis d'un flux monochromatique (surface Lambertienne). Les surfaces extérieures des sphères sont peintes, quant à elles, en noir afin de diminuer au maximum les flux rayonnants (grande et courte longueurs d'onde) provenant de l'extérieur ;
- des supports adaptés pour les deux sphères, le support laser et le porte-échantillon fabriqués sur mesure à partir d'une imprimante 3D ;
- deux plaques de Peltier de dimension identique d'environ 40 mm x 40 mm x 3.8 mm. La puissance variant entre 50 et 57 W avec une température chaude allant respectivement de 25°C à 50°C. La variation de la température entre les deux surfaces de chaque plaque peut atteindre 75°C. Ces plaques serviront de source chaude et source froide lors des expérimentations pour déterminer la valeur de la constante de conductivité thermique d'un matériau en régime permanent.

Au niveau de l'instrumentation, nous avons utilisé :

- quatre thermocouples de type K étalonnés pour mesurer la température de surface des échantillons ainsi que celle des plaques de Peltier en contact avec ces derniers ;
- et trois mini photodiodes pour la mesure des flux thermiques radiatifs provenant du laser et incidents aux surfaces sphériques intérieures (peintes en blanc). Pour cela, un coefficient d'étalonnage du signal électrique (i.e. la tension en mV) émis par la photodiode permet d'obtenir la valeur du flux thermique recherchée (en $W.m^{-2}$) par une méthode de calibration comparative (i.e. avec un fluxmètre étalon). Le choix de ces mini photodiodes repose sur le fait que la surface de mesure de la sphère est pratiquement concave et que seuls des capteurs de très faibles dimensions peuvent être positionnés sur ces surfaces sans perturber les mesures ;
- une centrale d'acquisition de type Campbell (le modèle CR6).

S'agissant des lois appliquées sur le prototype, la démarche a été la suivante :

Le calcul de la conductivité thermique du matériau est réalisé grâce à la loi de Fourier en régime permanent (voir l'équation 6.1). Un flux thermique connu, créé par deux plaques de Peltier, traverse l'échantillon d'épaisseur également connue. Deux thermocouples placés de part et d'autre des surfaces de l'échantillon, en contact direct avec les deux plaques de Peltier servant de source chaude et source froide, permettent de connaître les valeurs de température à la surface inférieure et supérieure de l'échantillon. La constante de la conductivité thermique λ est ainsi déduite.

Pour ce qui est des constantes optiques, les dispositifs à sphère d'intégration ont été construits avec des matériaux qui génèrent des surfaces Lambertiennes [Car97], c'est-à-dire des surfaces qui réfléchissent les flux de rayonnement de manière diffuse (voir Figure 6.1,b.) et dont la distribution de l'intensité du flux réfléchi obéit à la loi du cosinus de Lambert, donnée par la relation suivante :

$$I_r(\theta) = I_0 cos\theta \tag{6.5}$$

où : I_r est l'intensité radiante réfléchie exprimée en W/sr, I_0 est l'intensité radiante du rayonnement réfléchi à un angle $\theta_0 = 0^o$ et θ est l'angle mesuré par rapport à la normale. La Figure 6.1 montre la distribution de l'intensité radiante générée par une surface Lambertienne. Une autre façon de définir une surface Lambertienne est de dire que sa radiance L en $Wsr^{-1}m^{-2}$ est constante, c'est-à-dire indépendante de l'angle d'observation θ.

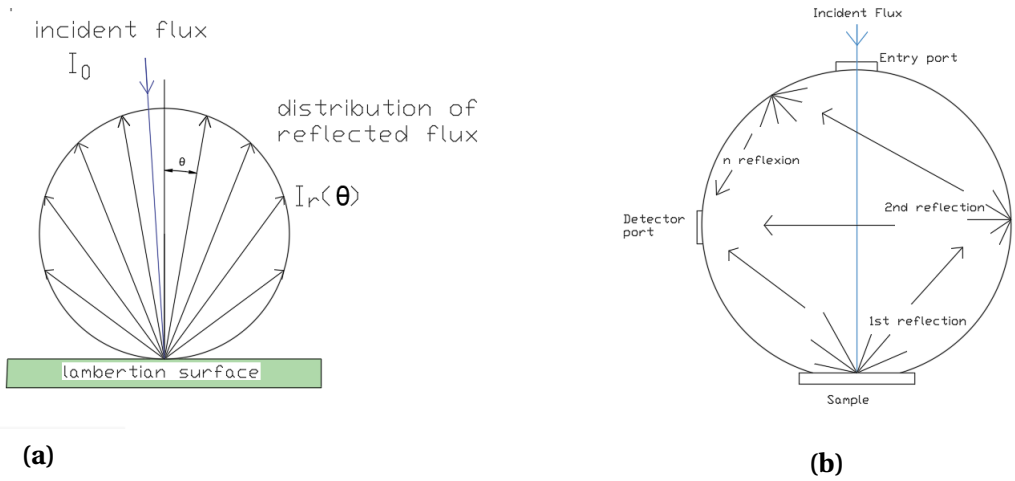

Fig. 6.1.: Phénomènes de réflexion au sein de la sphère : (a) Modèle de flux réfléchi sur une surface Lambertienne / (b) Réflexions multiples dans une sphère d'intégration

En supposant que la sphère d'intégration a des parois Lambertiennes, le flux incident vers la sphère est réfléchi plusieurs fois de sorte que le flux incident est distribué de manière homogène sur toute la surface de la sphère (une sphère intégrante idéale reflète entièrement le flux incident ; les sphères de qualité supérieure reflètent environ 99% du flux par rapport à la plage de longueur d'onde de conception). L'irradiance énergétique est définie comme le flux radiant par unité de surface irradiée (voir l'équation Eq.5).

$$E = \frac{\Phi}{A} \tag{6.6}$$

Le flux total incident sur la surface de la sphère d'intégration peut être calculé de manière très simple car l'irradiation est homogène. L'irradiation sur un détecteur placé dans l'une des ouvertures de la sphère sera égale à l'irradiation sur l'ensemble de la sphère intégrante :

$$E_{sphère} = E_{détecteur} = \frac{\phi_{détecteur}}{A_{détecteur}} \tag{6.7}$$

et donc :

$$\phi_{sphère} = \phi_{détecteur} \frac{A_{sphère}}{A_{détecteur}} \tag{6.8}$$

où : $\phi_{sphère}$ est le flux contenu dans la sphère, $\phi_{détecteur}$ est le flux dans le détecteur, $A_{sphère}$ et $A_{détecteur}$ sont les aires de la sphère et du détecteur, respectivement, où $A_{sphère} = 2\pi R^2$.

Le flux radiant contenu dans la sphère est supérieur au flux incident car le flux incident subit de multiples réflexions dans la sphère, ce qui est plus évident si les contributions de chaque réflexion sont additionnées. Ce fait est rendu explicite par l'introduction du concept de "multiplicateur de sphère" [PC13].

Pour la première réflexion, le flux réfléchi est :

$$\phi_1 = \phi_i \, \rho \tag{6.9}$$

Où : ϕ_i est le flux radiant incident et ρ est la réflectance de l'échantillon. La quantité f comme fraction de la zone portuaire est exprimée par :

$$f = \frac{A_{sphèredeporte} + A_{détecteurdeporte}}{A_{sphère}} \tag{6.10}$$

Ici : $A_{sphèreporte}$ est la zone du port d'entrée, $A_{détecteurdeporte}$ est la zone du port de détection, et $A_{sphère}$ est la surface de la sphère d'intégration. Dans la seconde réflexion, le flux réfléchi est :

$$\phi_2 = \phi_i \rho \rho_w (1 - f) \tag{6.11}$$

Où : ρ_w est la réflectance de la paroi interne de la sphère. La réflectance du détecteur a été supposée négligeable, alors que la réflectance du point d'entrée est naturellement nulle. La zone de l'échantillon a également été négligée. La troisième réflexion présente :

$$\phi_3 = \phi_i \rho \rho_w^2 (1 - f)^2 \tag{6.12}$$

et ainsi de suite jusqu'à la n-ième réflexion, dont la contribution est :

$$\phi_n = \phi_i \rho \rho_w^{n-1} (1-f)^{n-1} \tag{6.13}$$

En additionnant toutes ces contributions, le flux intégré par la sphère après n réflexions devient :

$$\phi^n_{sphère} = \phi_i \rho + \phi_i \rho \rho_w (1-f) + \phi_i \rho \rho_w^2 (1-f)^2 + ... + \phi_i \rho \rho_w^{n-1} (1-f)^{n-1} = \phi_i \rho \sum_{k=0}^{n-1} \rho_w^k (1-f)^k \tag{6.14}$$

Le calcul pour une réflection n à l'infini, devient alors :

$$\phi_{sphere} = \phi_i \frac{\rho}{1-\rho_w(1-f)} \tag{6.15}$$

En supprimant la réflectance en termes de flux, on peut obtenir ce qui suit :

$$\rho = \frac{\phi_{sphere}}{\phi_i} [1-\rho_w(1-f)] \tag{6.16}$$

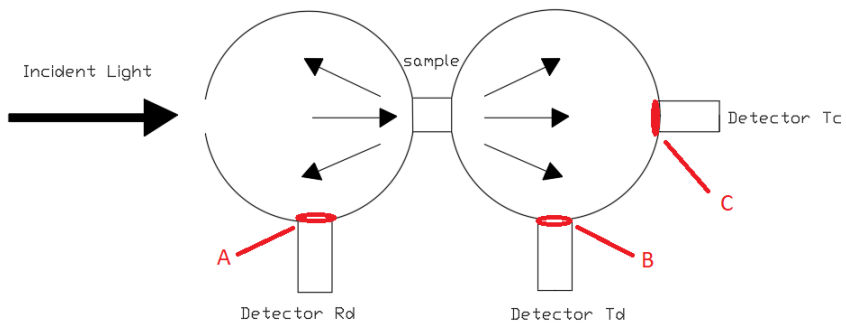

Fig. 6.2.: Double sphère d'intégration pour la mesure simultanée de la réflectance (un capteur en position A) et de la transmittance (deux capteurs en position B et C) pour un échantillon donné (voir [Car97])

Pour le flux traversant l'échantillon vers la seconde sphère d'intégration (voir Figure 6.2), nous avons :

$$\phi_{sphere2} = \phi_\tau \frac{\rho}{1-\rho_w(1-f)} \tag{6.17}$$

A partir de Eq.6.17 nous obtenons le flux transmis :

$$\phi_\tau = \phi_{sphere2} \frac{1-\rho_w(1-f)}{\rho} \tag{6.18}$$

En supposant à nouveau que l'irradiation est homogène en tout point de la seconde sphère d'intégration, le flux total contenu dans la sphère peut être écrit en fonction du flux du détecteur qui y est monté :

$$\phi_{sphere2} = \phi_{detector2} \frac{A_{sphere2}}{A_{detector2}} \tag{6.19}$$

En faisant correspondre les deux équations précédentes, on obtient ce qui suit :

$$\phi_\tau = \phi_{detecteur2} \frac{A_{sphere2}}{A_{detecteur2}} \frac{1-\rho_w(1-f)}{\rho} \tag{6.20}$$

Lorsque certains des photons incidents sur l'échantillon ne sont pas absorbés ou réfléchis par le matériau, ils passent à travers l'échantillon et suivent la même direction de propagation que le faisceau incident s'ils peuvent se propager librement. Le flux radiant composé de ces photons est appelé le flux cohérent, et nous le représentons par $\phi_{\tau coherent}$.

Avec les flux incidents, il est simple d'obtenir les transmittances diffuses et cohérentes. La détermination de ces transmissions est obtenue par les équations suivantes :

$$\tau_{diffuse} = \frac{\phi_\tau}{\phi_i} \tag{6.21}$$

$$\tau_{cohérent} = \frac{\phi_{\tau cohérent}}{\phi_i} \tag{6.22}$$

où $\tau_{diffuse}$ est la transmission diffuse et $\tau_{cohérente}$ est la transmission cohérente. La somme des deux nous donne la transmission globale du matériau à étudier.

En connaissant la réflectance et la transmission, il est possible de connaître l'absorptance optique de l'échantillon. Ainsi, la somme des flux transmis, réfléchis et absorbés doit être égale au flux incident et est donnée par :

$$\phi_i = \phi_{reflected} + \phi_\tau + \phi_{\tau coherent} + \phi_\alpha \tag{6.23}$$

En divisant tout par ϕ_i, nous avons :

$$1 = \rho + \tau_{diffuse} + \tau_{cohérente} + \alpha \tag{6.24}$$

A partir de cette équation, il est possible de déterminer le coefficient d'absorptance optique du matériau étudié.

Deux protocoles sont proposés en fonction du type de mesure (thermique ou optique) que l'on souhaite mener. Nous verrons ces deux méthodes dans ce qui va suivre.

6.2.1 Protocole en lien avec la mesure de la conductivité thermique

Soit D et F (voir Figure 6.3) deux plaques Peltier aux propriétés connues.

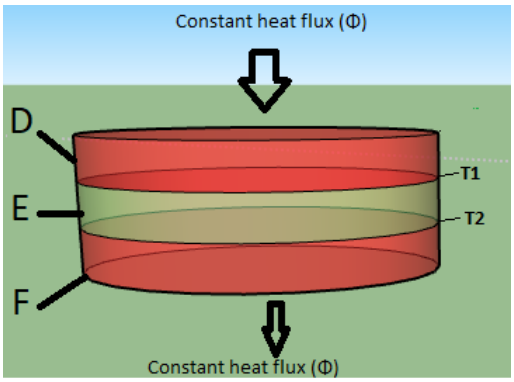

Fig. 6.3.: Technique de la mesure de la conductivité thermique en régime permanent

Soit E un spécimen dont on essaie de déterminer la conductivité thermique k en connaissant sa surface A et son épaisseur L. La technique de mesure consiste à prendre en sandwich l'échantillon E à étudier (voir Figure 6.3) en utilisant les deux autres plaques Peltier D (source chaude à température T_1 par exemple) et F (source froide constante à température T_2 par exemple) à flux constant. Pour maintenir le flux constant aux surfaces de chaque plaque Peltier en contact avec l'échantillon, une température constante est nécessaire, donc une puissance constante. Ce flux constant traverse l'échantillon et est utilisé pour déduire la valeur de la conductivité thermique de l'échantillon E à partir de la relation donnée par l'équation 6.1 (conservation du flux par la loi de Fourier en régime permanent avec l'échange de chaleur par conduction). Pour les mesures de la conductivité thermique de l'échantillon, les conditions initiales nécessaires pour obtenir l'état d'équilibre thermique dépendent fortement du matériau à étudier. Les Tableaux 6.1 résument les valeurs de mesure obtenues pour chaque matériau de l'échantillon lorsque cet état d'équilibre est atteint. Le flux thermique créé par les plaques Peltier qui permet de déterminer cette constante varie en fonction de l'échantillon étudié.

polystyrène					
Tension (V)	Intensité (A)	Épaisseur (m)	Surface (m^2)	ΔT	Flux (W)
1.2	0.9	0.0035	0.00125664	101	1.08
Polycarbonate					
Tension (V)	Intensité (A)	Épaisseur (m)	Surface (m^2)	ΔT	Flux (W)
7	0.565	0.006	0.00125664	85.5	3.955
Bois					
Tension (V)	Intensité (A)	Epaisseur (m)	Surface (m^2)	ΔT	Flux (W)
6.7	0.565	0.005	0.00125664	94	3.7855
Fer					
Tension (V)	Intensité (A)	Epaisseur (m)	Surface (m^2)	ΔT	Flux (W)
12	1.8	0.007	0.00125664	1.55	21.6

Tab. 6.1.: Flux et données de mesure de chaque matériau de réference

6.2.2 Protocole en lien avec les mesures simultanées de l'absorptance, la réflectance et la transmittance optique

Chaque échantillon a été placé dans un support d'échantillon puis placé entre les deux sphères et sur le chemin du laser; ensuite, des mesures du PIN de silicium (que nous avons placé dans la position indiquée sur la Figure 6.4 avant et après l'actionnement du laser) ont été prises pour déterminer le flux thermique du laser transmis, absorbé et réfléchi par l'échantillon. Pour les différents échantillons, les valeurs mesurées ont été obtenues et comparées avec celles du même matériel provenant de la littérature afin de calculer l'erreur relative. Au moins trois mesures répétables ont été effectuées pour chaque échantillon et les valeurs de mesure ont fait l'objet d'une moyenne. En raison des petites dimensions des spécimens utilisés dans les expériences, des conditions d'équilibre sont observées pendant deux minutes. Les conditions de mesure sont appliquées en deux étapes. Une première mesure est effectuée avant la mise en marche du laser (pour tenir compte des effets thermiques dus à l'environnement extérieur aux deux sphères qui influence les capteurs). Ensuite, une deuxième mesure est effectuée (quelques minutes plus tard) lorsque le laser est en marche. Cette mesure représente la valeur du flux global à l'intérieur et à l'extérieur des sphères que les capteurs peuvent identifier. La différence entre ces deux valeurs nous donne le flux radiatif du laser réel (c'est-à-dire une mesure sans aucune influence thermique de l'environnement extérieur aux deux sphères). Les conditions de mesure du flux radiant de chaque échantillon sont indiquées dans le Tableau 6.2.

Matériau : Polystyrène	Position des capteurs (voir Figure 6.4)		
Mesures (en mWm^{-2})	A	B	C
Sans laser (i)	4.92	3.12	0
Avec laser (ii)	61.16	26.96	0
Flux réels = (ii)-(i)	56.25	23.84	0
Matériau : Bois	Position des capteurs (voir Figure 6.4)		
Mesures (in mWm^{-2})	A	B	C
Sans laser (i)	3.07	3.07	0
Avec laser (ii)	72.02	3.07	0
Flux réels = (ii)-(i)	68.95	0	0
Matériau : Fer	Position des capteurs (voir Figure 6.4)		
Mesures (in mWm^{-2})	A	B	C
Sans laser (i)	2.72	3.61	0
Avec laser (ii)	137.83	3.62	0
Flux réels = (ii)-(i)	135.12	0.01	0
Matériau : Polycarbonate	Position des capteurs (voir Figure 6.4)		
Mesures (in mWm^{-2})	A	B	C
Sans laser (i)	4.07	4.08	6.47
Avec laser (ii)	98.51	174.98	140.53
Flux réels = (ii)-(i)	94.43	170.89	134.06

Tab. 6.2.: Valeurs mesurées par la photodiode (capteur optique) sur les 4 échantillons

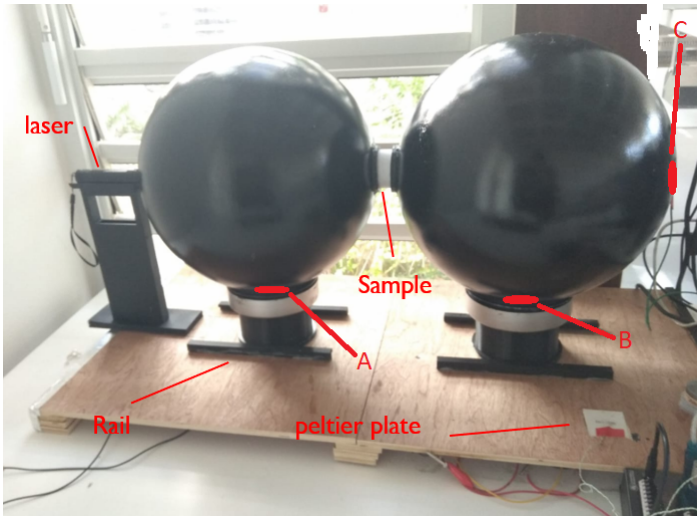

Fig. 6.4.: Positionnement des capteurs A, B et C sur le dispositif experimental McM

6.3 Résultats des travaux scientifiques réalisés

Plusieurs tests sur différents échantillons de matériaux de construction de même nature ou pas ont été menés. Dans ce qui suit, 4 échantillons (voir Figure 6.6) dont les propriétés thermo-optico-physiques sont connues ont été testés lors de ces expérimentations. Il s'agit d'une catégorie de fer, de polystyrène, de bois et enfin de polycarbonate bien spécifique utilisés dans la construction.

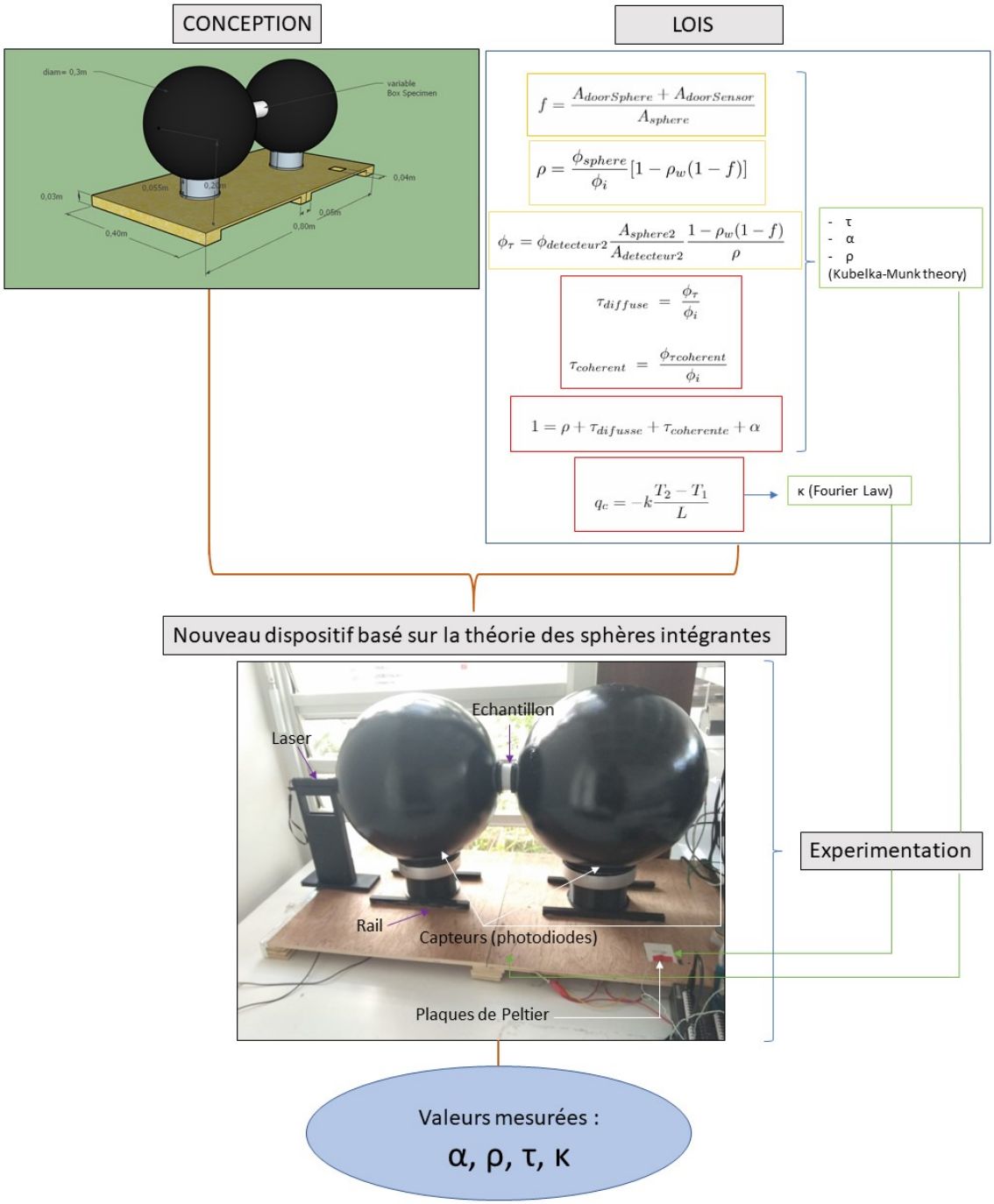

Fig. 6.5.: Conception et lois associées au Multi-Coef-Meter ou McM : mesures de la conductivité thermique ainsi que de la transmittance, reflectance et absorptance optique d'un matériau de construction complexe

Le Tableau 6.4 nous donne les valeurs de comparaison obtenues.

Quatre remarques découlent de l'observation de ces résultats :

Matériau	Diamètre (m)	Surfaces (m²)	Epaisseur (m)
Polycarbonate	0.04	0.00126	0.006
Polystyrène	0.04	0.00126	0.0035
Bois	0.04	0.00126	0.005
Fer	0.04	0.00126	0.007

Tab. 6.3.: Dimenssions des matériaux de références utilisés lors des tests de mesures sur le McM

Fig. 6.6.: Échantillons testés (de la gauche vers la droite) : le fer, le bois, le polystyrène et le polycarbonate

- L'erreur totale due au dispositif expérimental ne dépasse pas 4 %, ce qui comprend 2 % d'erreur relative due à l'ensemble des capteurs de mesure et 2 % d'erreur relative due au concept du système (c'est-à-dire le système McM construit : les couleurs des échantillons utilisés, la position du laser, la forme du système et les caractéristiques du matériau utilisé). Pour cette raison, une erreur de +/- 4% est introduite pour toutes les erreurs relatives entre les valeurs de référence et les valeurs expérimentales lors de la comparaison. Le Tableau 6.4 passe en revue ces comparaisons ;
- la norme ASTM E1225 [AST13b] stipule qu'un dispositif mesurant la conductivité thermique d'un matériau de construction et commettant une erreur relative globale d'environ 5% peut être considéré comme fiable. En ce qui concerne la réflexion, la transmission et l'absorption, la norme ASTM E903 [AST12b] affirme que les mesures de ces coefficients présentant des erreurs relatives inférieures à 4% sont acceptables. Le dispositif McM respecte cette marge d'erreur acceptable et recommandée par l'ASTM (c'est-à-dire autour de 5%). La CIE [Tec90] insiste sur la difficulté à mesurer ces propriétés thermo-optico-physiques. Dans certains cas de figure, les dispositifs existants commettent parfois des erreurs de mesure relative supérieures à 5% ;
- le dispositif expérimental est capable non seulement de caractériser simultanément les coefficients thermo-optico-physiques (c'est-à-dire l'absorbance, la réflectance et la transmittance optiques) des matériaux homogènes très divers et, plus particulièrement, des matériaux translucides (c'est-à-dire le polycarbonate), mais aussi de mesurer instantanément la valeur de la conductivité thermique du matériau en question. Les techniques de mesure existantes nécessitent plusieurs appareils différents pour déterminer ces paramètres ;

		λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	ρ (-)	τ (-)	α (-)
Polystyrène	Référence du matériau	0,03	0,04	0,04	0,91
	Mesures à partir du McM	0,029	0,041	0,042	0,92
	Erreurs relatives (en %)	-0,5	0,5	3,9	-0,7
Fer	Référence du matériau	80,2	0,64	0	0,36
	Mesures à partir du McM	77,63	0,63	0	0,37
	Erreurs relatives (en %)	1,21	0,02	-	-1,58
Bois	Référence du matériau	0,15	0,35	0	0,65
	Mesures à partir du McM	0,16	0,33	0	0,67
	Erreurs relatives (en %)	1,38	3,7	-	1,3
Polycarbonate	Référence du matériau	0,216	0,07	0,85	0,08
	Mesures à partir du McM	0,22	0,066	0,86	0,076
	Erreurs relatives (en %)	0,25	3,35	-1,91	-3,10

Tab. 6.4.: Récapitulatif des comparaisons entre les mesures du McM et les valeurs de référence

- globalement, les erreurs de mesure du McM proposées sont plus élevées pour le matériau translucide (polycarbonate) et plus faibles pour des matériaux opaques de la catégorie des isolants (par exemple le bois). Il faut souligner que les erreurs de mesure des propriétés de ces matériaux particuliers tels que ceux à base de polycarbonate sont plus élevées que pour les matériaux de type opaque (c'est-à-dire le bois et le fer).

Grâce à ce nouveau dispositif de mesure il est donc possible de caractériser les propriétés thermo-optico-physiques de matériaux de construction très variés. Les tests de conformité du système ont prouvé que les mesures effectuées sur le McM sont fiables. Ce qui mène à affirmer que le McM est un appareil qui respecte les normes standard actuelles de métrologie dans le domaine. Le dispositif proposé est relativement simple et économique; il est basé sur la théorie de la propagation des ondes dans un environnement sphérique appelé sphère intégrante (un système fermé). La source d'énergie utilisée pour éviter les phénomènes Lambertiens de diffusion de flux est un pointeur laser monochromatique d'environ 650 nm. L'idée d'un capteur de mesure de flux thermique basé sur une mini-cellule photovoltaïque est également discutée pour répondre aux contraintes liées aux positions des capteurs de mesure à l'intérieur de la sphère creuse constituant notre dispositif expérimental. Ces capteurs ont été spécialement calibrés par comparaison avec un fluxmètre de référence exposé à la même source monochromatique (laser). Dans le cadre de cette recherche, nous avons proposé un nouveau protocole adapté à ce système de mesure. Les résultats des mesures expérimentales obtenus montrent que le dispositif innovant présente une erreur globale d'environ 5 % et a une puissance maximale de source d'énergie pouvant atteindre 200 mW. Une base de données sur des mesures d'un polycarbonate alvéolaire (matériau translucide) à partir du dispositif conçu est disponible en open access sur Elsevier [B09].

6.4 Publications, projets/financements et brevet associés au sujet 4

- Revues spécialisées avec comité de lecture (2) :
  1. [$B07$] : **D. A. H. Fakra**, A. J. Blazquez Recio, N. M. Murad, J. C. Gatina, A new affordable and quick experimental device for measuring the thermo-optical properties of translucent construction materials, Journal of Building Engineering, Elsevier, DOI : 10.1016/j.jobe.2020.101708.
  2. [$B09$] : **D. A. H. Fakra**, Blazquez Recio Alfonso José, Nour Mohammad Murad, Ando Ny Aina Randriantsoa, Jean Claude Gatina, Experimental data and calibration processes to a new and simple device dedicated to the thermo-optical properties of a polycarbonate construction material, Journal of Data in Brief, Elsevier, accepté et en cours d'édition.
- Brevet national (1) :
  1. [$Brevet1$] : **Damien FAKRA**, Blazquez Recio Alfonso José, Nour Mohammad Murad, Jean Claude Gatina, Banc de mesure des propriétés thermo-physiques d'un échantillon de matériau, brevet français déposé le 29/05/2020 sous le numéro d'enregistrement FR2005688.
- Autres : documents internes, fascicules, rapports, etc. (1) :
  1. [$Document7$] : Alfonso José BLAZQUEZ RECIO, Titre : New concept and reliability degree of a system measuring four thermo-physic properties of complex materials, stage de recherche (4 mois) soutenu le 11 juillet 2019. Université de Grenade (ERASMUS), encadrement : 100%.
- Projet/Financements :
  1. [$Projet1$] : Un stage de recherche sur un projet ERASMUS entre l'université de Grenade (En Espagne) et l'université de La Réunion.

Sélection synthétique de la bibliographie sur le sujet 4 : le Multi-Coef-mètre (McM)

[AST12a] ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres*. Technical report ASTM E903-12. West Conshohocken, PA : American Society for Testing et Materials, 2012 (cf. p. 72).

[AST12b] ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres*. Technical report ASTM E903-12. West Conshohocken, PA : American Society for Testing et Materials, 2012 (cf. p. 83).

[AST13a] ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique*. Technical report ASTM E1225-13. 8 pp. West Conshohocken PA : American Society for Testing and Materials, 2013 (cf. p. 72).

[AST13b] ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique*. Technical report ASTM E1225-13. 8 pp. West Conshohocken PA : American Society for Testing and Materials, 2013 (cf. p. 83).

[Car97] Kf CARR. „Integrating sphere theory and applications Part I : Integrating sphere theory and design“. In : *Surface Coatings International* 80.8 (1997), p. 380-385 (cf. p. 74, 77).

[Par+07] A. PARRETTA, A. ANTONINI, M. ARMANI et al. „Double-cavity radiometer for high-flux density solar radiation measurements“. In : *Applied Optics* 46.12 (2007), p. 2166-2179 (cf. p. 73).

[PC13] Antonio PARRETTA et Gabriele CALABRESE. „About the definition of “multiplier” of an integrating sphere“. In : *Int. J. Opt. & Appl* 3.6 (2013), p. 119-124 (cf. p. 76).

[Tec90] TECHNICAL COMMITTEE TC-2.3. *Radiometric and Photometric Characteristics of Materials and their Measurement*. CIE publication 38. 89 pp. International Commission on Illumination, 1990 (cf. p. 83).

[VH04] Libor VOZÁR et Wolfgang HOHENAUER. „Flash method of measuring the thermal diffusivity. A review“. In : *High Temperatures-High Pressures* 35/36.3 (2004), p. 253-264 (cf. p. 72).

7 Amélioration d'un capteur de gaz et proposition d'une nouvelle méthode économique de quantification des biocarburants

Ces travaux entrent dans le cadre d'une collaboration entre l'I.S.T d'Antananarivo à Madagascar et le laboratoire PIMENT de l'université de la Réunion sur l'île de la Réunion [NID20]. La thématique métrologique développée répond à une triple problématique, à savoir le développement d'un prototype alternatif de mesure de gaz de synthèse, précis, à moindre coût et facilement transportable en zone rurale. Les résultats de mesure obtenus à partir de ces analyseurs de gaz dénommés "arduino-GABIL" (Gas Analyser aBIlity simpLy) permettent ensuite de répondre à des études de recherche concernant des bio-additifs dédiés aux carburants conventionnels alimentant des moteurs électriques en zone rurale. Notre cas d'étude porte plus précisément sur la caractérisation du biogaz provenant de la gazéification des déchets verts. Ces travaux ont fait l'objet d'un dépôt de brevet [Brevet2] et d'un article [B08] dans le journal "Sensors Internationnal" d'Elsevier.

Table des matières du chapitre 7

7.1 Contexte et problématique scientifique 90

7.2 Présentation du dispositif de mesure et des modèles associés 91

7.3 Résultats des travaux scientifiques réalisés 93

7.4 Publications, projets/financements et brevet associés au sujet 5 97

Sélection synthétique de la bibliographie sur le sujet 5 : arduino-GABIL (Gas Analysis aBIlity simpLy) 99

7.1 Contexte et problématique scientifique

La transformation énergétique de la biomasse représente une solution très intéressante pour répondre aux défis de l'électrification rurale dans les zones non connectées au réseau. Les déchets agricoles produits localement peuvent être valorisés pour alimenter ces systèmes énergétiques. Les gaz de synthèse obtenus sont ensuite utilisés pour alimenter des moteurs à combustion interne couplés à des générateurs électriques. L'énergie ainsi produite peut apporter une autonomie énergétique au village tout en réduisant ou supprimant l'utilisation des combustibles fossiles (voir [Hag+16; PBK15; BD17; HAS14] pour plus d'informations).

Les performances de ces installations sont mesurées à partir de la quantité et la qualité du gaz produit. Si la quantité peut être exprimée par le débit de gaz que peut fournir le système en question, la qualité est mesurée par son pouvoir calorifique. Le pouvoir calorifique du gaz de synthèse dépend de la nature et de la quantité de gaz combustible qu'il contient. Ces gaz combustibles sont principalement l'hydrogène H_2, le monoxyde de carbone CO et le méthane CH_4 (voir [Mar+12]).

La qualité et la quantité de gaz produit peuvent varier suivant la nature de la biomasse et les paramètres de fonctionnement du système énergétique utilisé. Un dispositif de mesure à proximité est donc utile pour mieux étudier les situations de chaque système localisé sur ces sites difficilement accessibles.

Les appareils les plus utilisées pour mesurer la composition du gaz de synthèse sont les chromatographes. Cependant, dans les milieux ruraux, l'utilisation de ces équipements souffre d'un coût d'investissement très élevé, d'une manipulation assez complexe et d'un transport difficile (dû par exemple à la volatilité des composantes du gaz). Les capteurs MQ sont initialement conçus pour être utilisés dans les systèmes de détection de fuite de gaz comme dans les alarmes anti-incendie. Dans ces applications, les capteurs envoient un signal à l'Arduino à partir d'un certain seuil de gaz détecté. Ce signal peut ensuite être converti en alarme ou autres actions comme l'envoi d'un message ou la mise en fonction d'un ventilateur. Le seuil d'envoi du signal peut être réglé suivant les besoins de l'utilisateur. On peut classifier ces applications de détection qualitative du gaz car l'objectif n'est pas de déterminer sa quantité exacte, mais de lancer une action à partir d'un certain seuil. La mesure quantitative du gaz implique l'exploitation du signal analogique du capteur pour calculer la concentration de gaz détectée. Il est basé sur des données de calibrage fournies par le fabricant. La plupart des capteurs de gaz utilisés pour la mesure quantitative sont rencontrés dans les nez électroniques (voir [CXP11; Ram12; Shr+13; KY17; BAG18]). Leur application dans le secteur de l'énergie concerne jusqu'à maintenant la mesure de la teneur en méthane du biogaz. Par exemple, Ahmed et al. [AAN17] ont utilisé un capteur MQ-2 pour mesurer la teneur en méthane du biogaz

produit par un biodigesteur de traitement d'eau usée situé au Maroc. Yang et al. [Yan+19] ont conçu un dispositif de mesure de la teneur en méthane de biogaz basé sur le MQ-4. Pour ramener la teneur du méthane dans la gamme de mesure du MQ-4 qui est de 200 ppm à 10 000 ppm, ils ont injecté le biogaz dans un récipient hermétiquement fermé pour le diluer dans l'air déjà présent. Par rapport aux travaux de Ahmed et al. et de Yang et al. qui s'intéressent à l'analyse du biogaz, notre travail consiste à mesurer la teneur en H_2 et en CH_4 du gaz de synthèse à l'aide du MQ-8 et du MQ-4. L'objectif est de trouver une technique simple et à moindre coût qui pourra être aisément appliquée dans les zones rurales isolées où sont installés les systèmes de gazéification.

Dans ce travail, il est proposé une nouvelle technique de mesure ainsi que l'amélioration du concept d'un capteur de mesure facilement transportable pour quantifier et caractériser, sur des sites isolés, la teneur en CH_4 et H_2 d'un gaz de synthèse.

7.2 Présentation du dispositif de mesure et des modèles associés

La technique proposée est celle de l'injection directe du gaz sur le capteur mis dans une capsule partiellement fermée. Les indicateurs utilisés pour évaluer chaque technique sont la répétabilité de la mesure et la linéarité entre la concentration du gaz injecté et la réponse du capteur. Nous utiliserons pour cela un gaz étalon contenant 20% de CH_4, 10% de CO_2 et 70% d'He, puis d'un étalon constitué de 99.99% de H_2.

Les dispositifs de mesure proposés, lors de cette étude, sont basés sur des détecteurs de gaz MQ-8 et MQ-4 (capteurs Arduino) connectés à une carte Arduino UNO et une mini-enceinte partiellement fermée (ou capsule) permettant de réaliser les mesures. L'originalité du système repose justement sur l'encapsulation de la tête du capteur en question suivant la forme proposée dans la Figure 7.1.

L'expérimentation consiste à injecter le gaz directement dans la capsule placée à l'air libre et à considérer le pic des valeurs enregistrées. La phase de dilution a été réalisée dans une seringue avant l'injection sur le capteur. Cinq volumes de gaz ont été prélevés avec la seringue : 2, 4, 6, 8 et 10 ml. De l'air a ensuite été aspiré dans la seringue pour la remplir jusqu'à 10 ml. Ainsi, pour chaque volume (2, 4, 6, 8 et 10 ml), 8, 6, 4, 2 et 0 ml d'air sont prélevés pour équilibrer, respectivement. La Figure 7.2 illustre la chaîne d'acquisition des mesures comprenant le capteur MQ encapsulé pour une meilleure analyse des gaz, une seringue graduée pour les injections de gaz, et une carte Arduino qui relie le capteur à l'ordinateur pour la collecte des données.

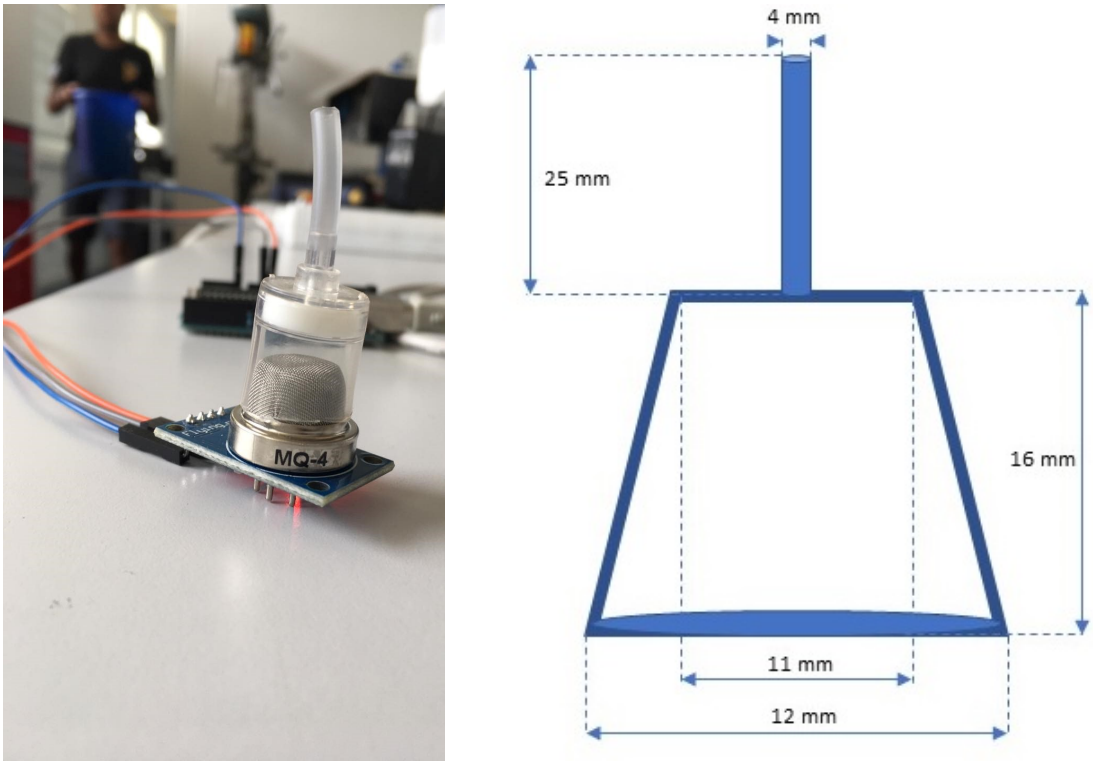

Fig. 7.1.: Dimensions de la capsule partiellement fermée des capteur MQ

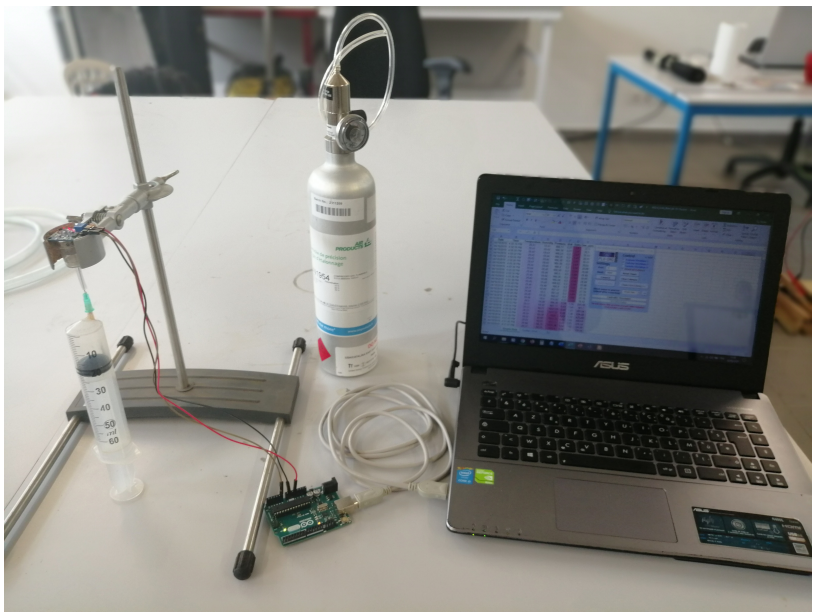

Fig. 7.2.: Dispositif de mesure des gaz constitué d'un capteur avec une minicapsule partiellement fermée, une carte Arduino, une seringue et un ordinateur

Les capteurs MQ ne sont pas adaptés à la mesure de très fortes concentrations (c'est-à-dire plus de 10 000 ppm). Pour résoudre le problème, un coefficient proportionnel C a été défini pour chaque capteur afin de tenir compte de la sensibilité des mesures. Le paramètre constant C du capteur est donné par la formulation suivante :

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i}{i} \tag{7.1}$$

avec

$$Y_i = \frac{R_i}{M_i} \tag{7.2}$$

où Y_i est le rapport de proportionnalité du volume i, M_i est la valeur du gaz mesurée par le capteur et R_i est la valeur du gaz étalon pour un volume i donné.

C devient alors le deuxième "coefficient de calibration" de l'ensemble du dispositif constitué du capteur et de la capsule en plus de la valeur de calibration du capteur lui même proposée par le constructeur. La détermination de C ne se fera qu'à partir d'un gaz étalon. Une fois le coefficient C retrouvé, les mesures sur un gaz quelconque contenant du H_2 (dans le cas du MQ-8) et du CH_4 (dans le cas du MQ-4) peuvent être menées.

7.3 Résultats des travaux scientifiques réalisés

La Figure 7.3 montre les données enregistrées pour six séries de mesure de CH_4 dans le gaz étalon composé de 20% CH_4, 10% CO_2 et 70% He. Pour l'injection directe dans un environnement ouvert (ou non hermétique), six volumes différents de gaz ont été collectés puis mélangés avec de l'air à l'intérieur de la seringue pour former un mélange de 10 ml : (2 ml de gaz + 8 ml d'air), (4 ml de gaz + 6 ml d'air), (6 ml de gaz + 4 ml d'air), (8 ml de gaz + 2 ml d'air) et enfin 10 ml de gaz (gaz étalon). Par rapport aux valeurs obtenues par injection à l'air libre, il y a une différence considérable entre les concentrations mesurées. Si la valeur maximale est de 6217 ppm pour une injection de gaz de 10 ml à l'air libre, alors, pour le même volume, le capteur est capable de détecter jusqu'à 42924 ppm dans la capsule partiellement fermée. Il convient de noter que cette valeur dépasse la plage de mesure de 200 à 10 000 ppm indiquée par le fabricant. Cependant, la courbe de concentration moyenne pour les six séries de mesure montre que la réponse du capteur est assez linéaire par rapport au volume de gaz injecté, avec un coefficient de corrélation linéaire de 0,9973. Il est donc justifié de prendre en compte ces valeurs. La possibilité d'utiliser le capteur au-delà de la plage de mesure indiquée par le fabricant a également été notée par Yang et al. [Yan+19] qui ont mesuré jusqu'à 110 000 ppm CH_4 de biogaz avec le MQ-4.

L'intégration de la capsule partiellement fermée sur le capteur a également amélioré la répétabilité des mesures. Comme le montre la figure 7.3, la répétabilité maximale moyenne de l'écart type des mesures pour les six volumes de gaz est de 14,28% avec 10 ml de gaz étalon. Cette valeur maximale est inférieure à l'écart type minimal de 15,13% calculé pour l'injection à l'air libre.

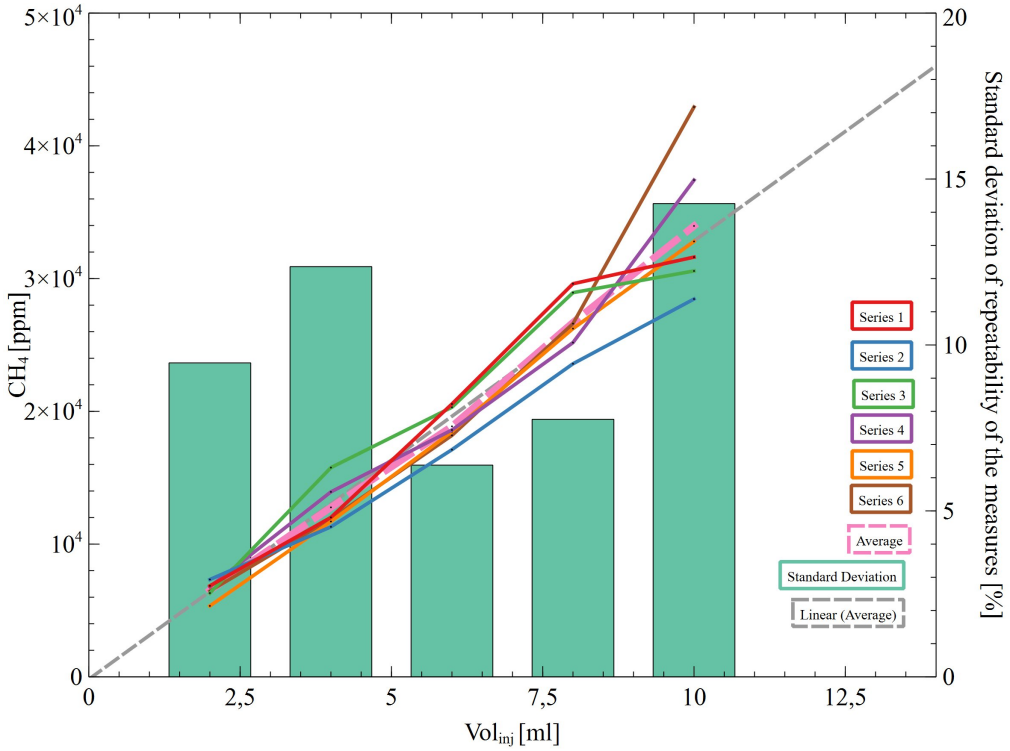

Fig. 7.3.: Variation de la concentration de CH_4 mesurée en fonction du volume injecté pour 6 séries de mesure dans une capsule partiellement fermée

Les résultats présentés dans la Figure 7.3 montrent que l'utilisation de la capsule partiellement fermée permet une bonne linéarité entre le volume injecté et la concentration détectée ainsi qu'une bonne répétabilité de la mesure. Néanmoins, les valeurs enregistrées ne correspondent pas à la concentration de CH_4 dans le mélange injecté même si le capteur est plus précis pour sa détection. La valeur du coefficient d'étalonnage C (voir eq. 7.1 pour le calcul de C et tableau 7.1 pour les Y_i) du capteur est égale à 6,19. La valeur a été multipliée par les valeurs expérimentales (CH_4_mes) fournies par le capteur pour calculer la concentration réelle du gaz (CH_4_adj). L'application de ce coefficient à chaque volume de gaz permet de corriger la mesure et d'obtenir les valeurs de concentration de CH_4_adj. Les erreurs absolues entre les concentrations du gaz étalon injecté (CH_4_std) et les valeurs corrigées (CH_4_adj) sont comprises entre 0,03% et 1,02% avec une erreur absolue moyenne de 0,40%. Nous avons constaté que l'erreur absolue minimale de 0,03% a été enregistrée lorsque le volume de gaz injecté était égal au volume disponible de la capsule qui est d'environ 2 ml.

Tab. 7.1.: Détermination du coefficient d'étalonnage du MQ-4

Vol_inj [ml]	CH_4_std [%]	CH_4_meas [%]	Y_i	CH_4_adj [%]	Errors [%]
2	4	0,65	6,14	3,99	0,03
4	8	1,28	6,27	7,83	0,10
6	12	1,89	6,36	11,57	0,32
8	16	2,67	5,99	16,36	0,52
10	20	3,40	5,89	20,82	1,02

Le même protocole utilisé pour la mesure du CH_4 a été appliqué à la mesure de H_2. Pour limiter le mouvement du gaz favorisé par la volatilité de l'hydrogène, le capteur est positionné à l'envers comme le montre la Figure 7.4.

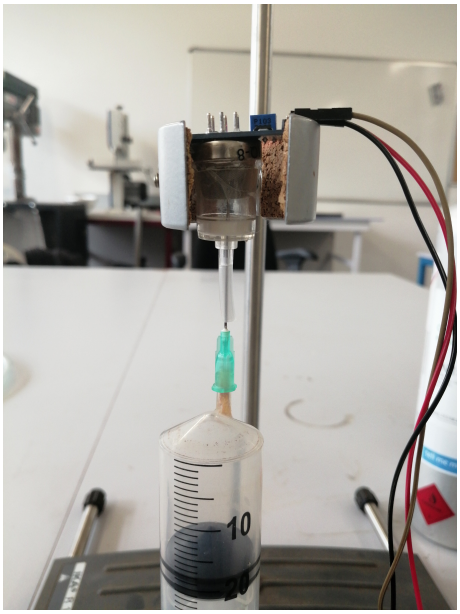

Fig. 7.4.: Position du MQ-8 pour la mesure du H_2 dans le capsule

La mesure optimale est obtenue pour des volumes d'échantillon allant de 2 à 8 ml. Lors de la détermination de C, la valeur d'erreur absolue est minimisée lorsque que le volume d'échantillon est égal à deux fois celui de la capsule, soit 4 ml.

Tab. 7.2.: Détermination du coefficient d'étalonnage du MQ-8

Vol_inj [ml]	H_2_std [%]	H_2_meas [%]	Y_i	H_2_adj [%]	Errors [%]
2	3,33	0,048	130,32	4,32	0,98
4	6,67	0,033	200,82	5,60	1,06
6	10,00	0,055	182,25	9,26	0,74
8	13,33	0,082	161,69	13,92	0,58

La mesure de la concentration de gaz par injection directe sur le capteur dans une capsule partiellement fermée améliore la répétabilité de la mesure en raison de l'environnement mieux contrôlé dans lequel le capteur est placé. Comme le mouvement du gaz est limité par le volume restreint disponible dans la capsule, la couche sensible du capteur est

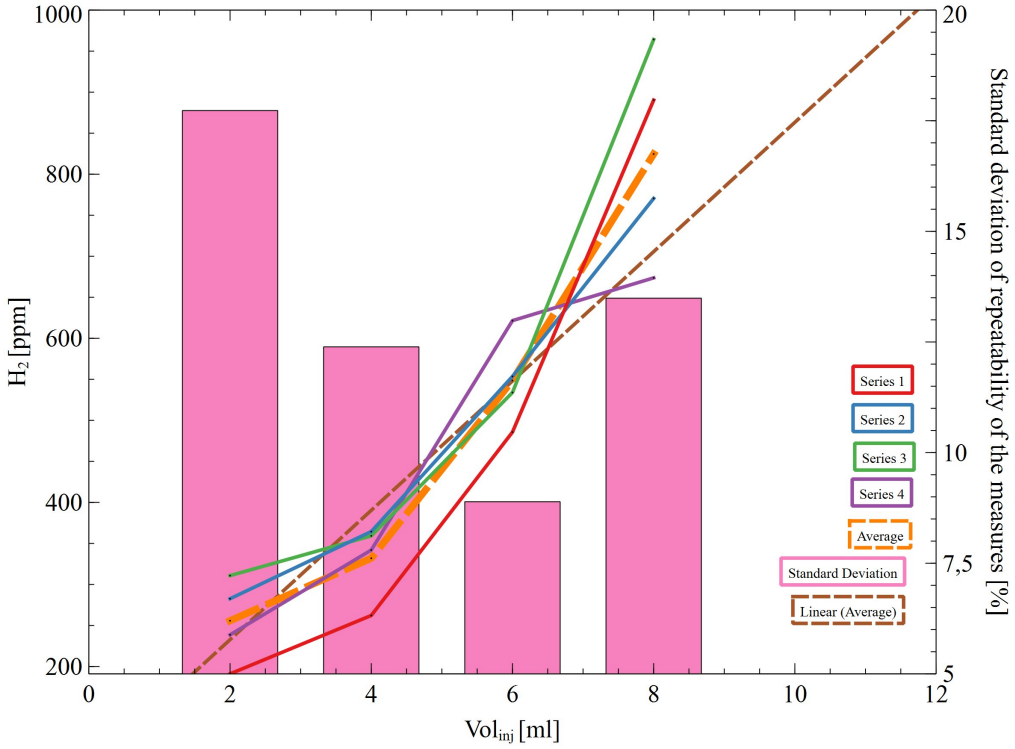

Fig. 7.5.: Variation de la concentration de H_2 mesurée en fonction du volume injecté pour un mélange de 60 ml (2 à 8 ml de H_2)

en contact avec une plus grande partie du gaz. Les valeurs mesurées sont donc plus pertinentes. Par rapport à l'utilisation du récipient hermétique, cette technique offre également les avantages d'une manipulation simple et d'une alimentation plus stable. Comme la capsule n'est pas entièrement fermée hermétiquement, le gaz injecté n'est pas retenu au niveau du capteur. Les valeurs considérées sont alors les pics mesurés mais pas les valeurs stables comme dans le cas du récipient hermétiquement fermé. De plus, en raison de la petite taille de la capsule, il est difficile de placer d'autres capteurs à l'intérieur pour mesurer des paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité ou la pression. Enfin, malgré l'amélioration des mesures, il existe toujours des écarts entre les valeurs mesurées et la teneur du mélange injecté. Pour cette raison, la technique nécessite une étape d'étalonnage avec du gaz étalon, effectuée avant de commencer les mesures, pour corriger les valeurs données par le capteur. Le volume de la capsule est important pour une bonne mesure, et la taille optimale varie en fonction de la concentration de gaz étalon à déterminer. Plus la concentration de méthane ou d'hydrogène est élevée dans le gaz étalon, plus le volume de la capsule est important. En ce qui concerne la quantité de gaz à injecter dans la capsule, deux conditions sont requises : pour le méthane, le volume injecté doit être égal au volume disponible à l'intérieur de la capsule ; pour l'hydrogène, le volume injecté doit être le double du volume disponible de la capsule. Ces considérations améliorent considérablement la précision de la mesure.

7.4 Publications, projets/financements et brevet associés au sujet 5

- Revues spécialisées avec comité de lecture (2) :
  1. [$B08$] : **D. A. H. Fakra**, D. A. S. Andriatoavina, N. A. M. N. Razafindralambo, K. A. Amarillis, J. M. M. Andriamampianina, A simple and low-cost integrative sensor system for methane and hydrogen measurement, Sensors International Journal, Elsevier, `https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100032`.
  2. [$B13$] : D. A. S. Andriatoavina, **D. A. H. Fakra**, N. A. M. N. Razafindralambo, J. P. Praene, J. M. M. Andriamampianina, Potential of fueling spark-ignition engines with syngas or syngas blends for power generation in rural electrification : A short review and S.W.O.T. analysis, Sustainable Energy Technologies and Assessments Journal, Elsevier, `https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106289`.
- Thèse (1) :
  1. [NID20] : Dolly ANDRIATOAVINA, intitulé de la thèse : Influence de l'ajout de HHO sur les performances d'un moteur à allumage commandé et alimenté en gaz de synthèse, Soutenance de thèse prévue vers la mi-décembre 2020, Institut Supérieure de Technologie d'Antananarivo, Madagascar, Directeur de thèse : José ANDRIAMAMPIANINA, Co-direction : 40%.
- Brevet national (1) :
  1. [$Brevet2$] : **Damien FAKRA**, Dolly Armel Sylvain ANDRIATOAVINA, Jean Claude GATINA, dispositif et procédé de mesure d'un élément chimique dans un échantillon d'un gaz, brevet français déposé le 27/07/2020 sous le numéro d'enregistrement FR2007873.
- Projet/Financements (1) :
  1. [$F13$] : Deux stages de recherche (en 2019 puis 2020) de 6 mois chacun sur un projet ERASMUS+ entre l'IST d'Antananarivo et l'université de la Réunion.
- Autres : documents internes, fascicules, rapports, etc. (2) :
  1. [$E11$] : Andriatoavina D. A. S., **Fakra D.**, Fascicule de Travaux Pratiques (TP) expérimentaux en Génie des procédés : Conception d'un électrolyseur dédié à l'étude du HHO (rendement, puissance, analyse du gaz, etc.) et rédaction d'un protocole de mesures. TP dédié aux étudiants de 3ème année en Licence Génie Civil et Environnement du département Science du Bâtiment et de l'Environnement (S.B.E) de l'UFR S.H.E en 2019.
  2. [$E12$] : Andriatoavina D. A. S., **Fakra D.**, Fascicule de Travaux Pratiques (TP) expérimentaux en Génie des procédés : étude du rendement d'un moteur thermique ayant un carburant de mélange (HHO + diesel) et rédaction d'un

protocole de mesures. TP dédié aux étudiants de 3ème année en Licence Génie Civil et Environnement du département Science du Bâtiment et de l'Environnement (S.B.E) de l'UFR S.H.E en 2020.

Sélection synthétique de la bibliographie sur le sujet 5 : arduino-GABIL (Gas Analysis aBIlity simpLy)

[AAN17] W Ait AHMED, M AGGOUR et M NACIRI. „Biogas Control : Methane Production Monitoring Using Arduino“. en. In : *International Journal of Biotechnology and Bioengineering* 11.2 (2017), p. 4 (cf. p. 90).

[BAG18] Arijit BANIK, Bodhayan AICH et Suman GHOSH. „Microcontroller based low cost gas leakage detector with SMS alert“. en. In : *2018 Emerging Trends in Electronic Devices and Computational Techniques (EDCT)*. Kolkata : IEEE, mar. 2018, p. 1-3 (cf. p. 90).

[BD17] Richard BATES et Klaus DÖLLE. „Syngas Use in Internal Combustion Engines - A Review“. en. In : *Advances in Research* 10.1 (jan. 2017), p. 1-8 (cf. p. 90).

[CXP11] Ding CHENGJUN, Liu XIMAO et Duan PING. „Development on Gas Leak Detection and Location System Based on Wireless Sensor Networks“. en. In : *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Shanghai, China : IEEE, jan. 2011, p. 1067-1070 (cf. p. 90).

[Hag+16] Ftwi Yohaness HAGOS, Abd Rashid Abd AZIZ, Shaharin A. SULAIMAN et Bahaaddein K.M. MAHGOUB. „Low and Medium Calorific Value Gasification Gas Combustion in IC Engines“. en. In : *Developments in Combustion Technology*. Sous la dir. de Konstantinos G. KYPRIANIDIS et Jan SKVARIL. InTech, oct. 2016 (cf. p. 90).

[HAS14] Ftwi Yohaness HAGOS, A. Rashid A. AZIZ et Shaharin Anwar SULAIMAN. „Trends of Syngas as a Fuel in Internal Combustion Engines“. en. In : *Advances in Mechanical Engineering* 6 (jan. 2014), p. 401587 (cf. p. 90).

[KY17] Ravi Kishore KODALI et Subbachary YERROJU. „IoT based smart emergency response system for fire hazards“. en. In : *2017 3rd International Conference*

on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT). Tumkur : IEEE, déc. 2017, p. 194-199 (cf. p. 90).

[Mar+12] Juan Daniel MARTÍNEZ, Khamid MAHKAMOV, Rubenildo V. ANDRADE et Electo E. SILVA LORA. „Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines“. en. In : *Renewable Energy* 38.1 (fév. 2012), p. 1-9 (cf. p. 90).

[NID20] Elassad NIDHOIMI. „Influence de l'ajout de HHO sur les performances d'un moteur à allumage commandé et alimenté en gaz de synthèse“. Doctorat. Madagascar : Université de La Réunion, 2020 (cf. p. 97).

[PBK15] Anushka PRADHAN, Prashant BAREDAR et Anil KUMAR. „Syngas as An Alternative Fuel Used in Internal Combustion Engines : A Review“. en. In : *Journal of Pure and Applied Science Technology* 5 (2015), p. 16 (cf. p. 90).

[Ram12] V RAMYA. „Embedded system for Hazardous Gas detection and Alerting“. en. In : *IJDPS* 3.3 (mai 2012), p. 287-300 (cf. p. 90).

[Shr+13] Ashish SHRIVASTAVA, Ratnesh PRABHAKER, Rajeev KUMAR et Rahul VERMA. „GSM Based Gas Leakage Detection System“. en. In : *International Journal of Technical Research and Applications* 1.2 (2013), p. 4 (cf. p. 90).

[Yan+19] Shunchang YANG, Yikan LIU, Na WU et al. „Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas“. en. In : *Renewable Energy* 138 (août 2019), p. 224-229 (cf. p. 91, 93).

8

L'éléctrophysiologie des plantes (biocapteurs) au service de la mesure d'indices de confort humain dans un microclimat habitable

Cette thématique de recherche encore récente découle d'une collaboration que j'ai initiée, cette année 2020, entre notre université, l'IST d'Antananarivo et l'université Claude Bernard à Lyon. Les résultats que nous allons présenter ici sont les premières bases de connaissances obtenues parmi une série de travaux scientifiques préalablement définis et qui seront menés par chaque laboratoire de chaque institution partenaire autour de ce sujet de recherche en fonction de leur spécialité. En effet, l'IST s'occupera de la conception électronique de la future chaîne d'acquisition qui mesurera le phénomène électrophysiologique de la plante. L'université de Lyon se chargera, quant à elle, de la caractérisation de la plante idéale pour ce type de mesure ainsi que de la conception des connectiques qui seront utilisées, à base de nano-bioparticules, et donc inoffensives à la plante afin d'assurer sa survie. La tâche de l'université de la Réunion sera, quant à elle, d'expérimenter puis de proposer des modèles de connaissances en météorologie en lien avec le signal électrique de la plante vis-à-vis des sollicitations du milieu environnant. Elle développera plusieurs applications autour de l'évaluation des paramètres de confort dans les bâtiments et de contrôle de nombreuses structures en travaux publics. En ce qui concerne notre université, les travaux de recherche sur le sujet ont déjà démarré [Document8]. Un brevet [Brevet3] est en cours de dépôt et un article est en cours d'évaluation [B11]. Les résultats seront présentés dans ce qui va suivre.

Table des matières du chapitre 8

8.1 Contexte et problématique scientifique 103

8.2 Expérimentations menées sur le signal électrique d'une plante en vue de développer un biocapteur 105

8.3 Résultats des travaux scientifiques réalisés 109

8.4 Publications, projets/financements et brevet associés au sujet 6 115

Sélection synthétique de la bibliographie sur le sujet 6 : Biocapteur **117**

8.1 Contexte et problématique scientifique

Le signal électrique dans la plante a été mis en évidence il y a 200 ans. Bien que l'existence de ce signal ait entraîné beaucoup de controverses, des études ont été publiées sur les signaux électrochimiques et électriques chez les végétaux [Vol12; Vol+13; KDT]. Ces signaux sont en intercorrélation avec les variations de son environnement. Des hypothèses ont été élaborées et vérifiées sur l'origine et le mode de propagation de ces signaux [Vol12; Vol+13; KDT]. La plupart des modèles trouvés sur les signaux électriques de la plante démontrent qu'ils se créent au niveau des cellules [Hil+12; Zha+13; Suk+13; Cha+14; Suk+16; VAS15; Che+16; SAS17; Bei19]. Les premières études sur le sujet se sont concentrées sur les plantes sensibles mécaniquement, comme le Mimosa pudica et la plante carnivore Venus Flytrap. Cette étude a été initiée par le physiologiste médical Sir John Burdon-Sanderson vers 1873. Il a effectué des expérimentations sur les feuilles de la Dionaea muscipula Ellis. Cette expérimentation lui a permis de découvrir le potentiel d'action qui est un signal électrique. Par la suite, le mécanisme de fermeture de la trappe de la Dionaea muscipula Ellis a inspiré beaucoup de recherches sur le potentiel d'action. Un potentiel d'action est une impulsion électrique de faible amplitude provoquée par des stimulations qui ne détruisent pas la plante. Ces stimulations peuvent être une stimulation électrique ou mécanique, une variation de température, une variation de la lumière ou de rayonnement d'autres longueurs d'onde et des agents chimiques. Le potentiel d'action se manifeste alors au niveau d'une cellule avec un changement de potentiel de membrane. Il se propage automatiquement dans la plante, à travers le phloème, à une amplitude constante. La propagation est liée aux tissus vivants de la plante, notamment par les canaux ioniques de calcium. Ainsi, il est considéré comme un signal électrique à longue distance [Vol12; Suk+11]. À la suite de la découverte du potentiel d'action, le terme potentiel de variation a été introduit par Houwinck en 1935. Le potentiel de variation est un signal électrique de forme non déterminée. La forme du signal dépend de la nature de la stimulation et de la plante. Le potentiel de variation est provoqué par des "blessures" ou "brûlures". Il se propage à faible vitesse à travers le xylème avec une amplitude variable d'environ 10 mV. De même que le potentiel d'action, le potentiel de variation est considéré comme un signal à longue distance [Vol12]. Le potentiel électrotonique est aussi un potentiel électrique retrouvé dans les petits neurones. Il se propage à courte distance avec une amplitude décroissante liée à celle du stimulus. Ce potentiel électrique se remarque souvent lors des expérimentations par électrostimulation. Ces expérimentations ont été effectuées sur plusieurs espèces de plantes telles que le Dionaea muscipula Ellis, l'Aloe Vera, le Mimosa pudica et le fruit d'un pommier [Vol+13; Vol+16b; Vol+17; VS18]. Par exemple, des potentiels électrotoniques sont remarqués lors de l'électrostimulation par une impulsion carrée des feuilles supérieures ou inférieures de la trappe à mouches de Vénus.

Des modèles analytiques et circuits électriques équivalents ont été proposés afin de faciliter la compréhension des activités électriques de la plante [VB06; VCM09a; VFM10; Vol+14; Su+15]. Certaines recherches ont abouti à la conclusion que le signal électrique dans les plantes est dû au flux de sève. Des expérimentations in situ confirment cette hypothèse en démontrant que le signal varie en fonction du flux de sève. Cependant, d'autres auteurs pensent que ce n'est pas le seul facteur en cause [Gib+06; LZM08; GH09; Him10; LMGP10; Hao+17; Hao+18].

Dans le même axe, des expérimentations artificielles ont été menées pour déterminer la relation entre le signal généré par la plante et les stimuli. Ces expérimentations ont été menées dans des laboratoires avec des conditions spécifiques. Les plantes ont été placées sur une table antivibration entourée d'une cage de Faraday où la température a souvent été gardée constante [Vol+04; VAJ07; Vol+10b; Vol+15; Vol+16a]. Lors de ces essais artificiels, des stimulations mécaniques, électriques [VAJ07; MVJ08; Vol+10b; Vol+15; Vol+16a], chimiques [Mai+10] et lumineuses [Vol+04] ont été appliquées. Il existe plusieurs méthodes de mesure mais elles sont toujours basées sur l'utilisation des électrodes [KSW00]. Les électrodes sont insérées dans les cellules (microélectrodes), ou sinon placées à la surface (électrodes ECG), ou encore insérées directement dans la plante. Les résultats de ces expérimentations ont permis de confirmer l'existence de potentiels électriques. Ils ont été observés dans la tige, la racine et les feuilles en fonction de la stimulation et des méthodes de mesure. L'interprétation des données obtenues montre que le signal électrique des plantes peut traduire des informations utiles liées à la variation du climat.

Toutes ces études prouvent que la plante réagit au toucher [FL07; VCM09b] [Vol+10a; BYZ15], à la pression mécanique [AB72], aux divers agents chimiques, à la température [Lau+05; Hao+17] et aux irradiations [Vol+07; ORO15; Loc+19]. De plus, des travaux ont montré que les plantes peuvent détecter les polluants atmosphériques comme l'ozone [Kar+95; Cha+97; Zha+01; Mor+02; EK03; Fur+07; Mor+15]. Effectivement, la majorité des études menées sur le sujet conclue que l'organisme de la plante est complexe, mais les opportunités d'exploitation du signal électrique produit par ce dernier sont nombreuses et pertinentes. Les applications telles que la surveillance de l'environnement (détection des polluants, des pesticides, de l'ambiance) et les indicateurs d'ambiance d'un bâtiment sont possibles. Dans ce cas, la perspective d'utiliser la plante comme biocapteur environnemental est envisageable. Nous explorerons d'autres applications en lien avec le fonctionnement thermodynamique des bâtiments ou les variations thermo-physiques caractéristiques des paramètres structurels d'infrastructures en génie civil.

8.2 Expérimentations menées sur le signal électrique d'une plante en vue de développer un biocapteur

La littérature scientifique que nous avons présentée auparavant nous indique que les plantes génèrent des impulsions électriques au niveau cellulaire suite a différents stimuli qu'elles subissent par rapport à leur environnement. Les signaux résultants de ces excitations participent alors à l'apparition d'une différence de potentiel au sein de l'espèce vivante en question. Nous avons tenu à comprendre le mécanisme qui engendre ce phénomène et à trouver un lien avec certaines variables physiques en météorologique. Pour cela, nous nous sommes d'abord intéressés aux paramètres électrophysiologiques qui influencent cette tension créée par la plante. Des expériences ont donc été menées sur six variétés de plantes (un acacia, un sapin, un bananier, une robinia, un frangipanier et un manguier en milieu in situ. Voir la Figure 8.1) à Madagascar, dans la ville d'Antananarivo.

Fig. 8.1.: Plantes assujetties à l'expérimentation

Le choix de ces plantes a été fait aléatoirement. Le but principal ici n'étant pas d'optimiser ce signal ni de retrouver les dimensions optimales favorables à la création de ce signal.

Individu	Circonférence du tronc [cm]
Sapin	25
Acacia	30
Bananier	28
Robinia	2,4
Manguier	11
Frangipanier	8

Tab. 8.1.: Circonférence du tronc des espèces vivantes sélectionnées

Pourcentage de surface ombragée	Indice foliaire
100	5
80	4
60	3
40	2
20	1
0	0

Tab. 8.2.: Détermination de l'indice foliaire

L'objectif est tout simplement d'observer la variation de ce signal en fonction de certains critères et/ou paramètres de la plante, mais aussi de l'influence des connectiques (anodes et cathodes) utilisées pour récolter ce signal. Lors des mesures, des hypothèses telles que :

— la considération que nous avons affaire à un sol meuble c'est-à-dire que les éléments nutritifs contenus dans le sol sont bien absorbés par la plante ;

— la température de la plante considérée lors de l'expérimentation est celle de l'ambiance ;

— la notion temporelle ne sera pas prise en compte lors de cette expérimentation ;

— ne disposant pas d'appareil de mesure du taux d'humidité dans le sol, nous avons considéré pour l'heure trois scénarios possibles : soit une humidité du sol égale à 4% (sol sec), soit une humidité de 30% (sol semi-humide) et enfin soit une humidité égale à 70% (sol quasi-humide).

Les paramètres qui ont été étudiés vis-à-vis du signal de la plante sont : la circonférence du tronc de l'arbre ou de la tige (mesurée à l'aide d'un ruban métrique. Voir le Tableau 8.1), l'indice foliaire (grandeur sans dimension représentant la densité de feuillage. Il a été estimé en fonction du pourcentage de surface ombragée par les feuilles par rapport à sa superficie totale. Voir le Tableau 8.2 pour la détermination de cet indice par rapport aux pourcentages de surface ombragée)

A partir des références établies dans le Tableau 8.2, nous avons défini l'indice foliaire de chaque individu dans le tableau 8.3.

Individu	Indice foliaire
Sapin	2,5
Acacia	4
Bananier	0,75
Robinia	4
Manguier	3
Frangipanier	0,1

Tab. 8.3.: Indice foliaire des individus

Matériau de l'électrode	Conductivité électrique $[10^6 Siemens/m]$
Acier	5,9
Aluminium	36,9
Cuivre	58,7
Nickel	14,3
Plomb	4,7

Tab. 8.4.: Conductivité électrique des électrodes

S'agissant de l'étude sur l'influence des connectiques utilisées pour récolter le signal, nous avons établi une série de mesures tests à partir d'électrodes connues et données par le Tableau 8.4.

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'étude de deux des variables de confort thermique intérieur connues, à savoir la température ambiante et l'humidité relative à l'intérieur d'une enceinte climatique. L'objectif final de cette expérimentation a été d'analyser les réponses électriques de la plante Heliconia psittacorum, induites par la variation de la température et de l'humidité relative à l'intérieur d'un bâtiment. L'expérience consiste à placer la plante dans une enceinte climatique conçue spécialement pour cet effet. Pour cela, un environnement expérimental artificiel a été réalisé (voir Figure 8.2).

Fig. 8.2.: Enceinte climatique dédiée aux expérimentations

Les dimensions du dispositif expérimental sont données dans la Figure 8.3.

Fig. 8.3.: Dimensions de l'enceinte climatique

L'extérieur de l'enceinte est de couleur noire et les parois intérieures sont recouvertes d'un isolant (mousse de polystyrène recouverte d'aluminium réfléchissant). Le système conçu est en mesure de reproduire artificiellement l'éclairement énergétique représentant le soleil grâce à une lampe halogène pouvant à la fois produire de la chaleur, donc une température ambiante, mais également une densité de flux radiatif pouvant alors être assimilée à l'irradiation. Une des façades de l'enceinte peut être entièrement ouverte, vitrée à l'aide d'un plexiglas ou obstruée si besoin est. Nous avons aussi la possibilité de générer des vitesses de vent (à différentes températures) variables grâce aux deux ventilateurs installés sur deux des parois de l'enceinte. L'enceinte a été entièrement conçue avec du matériel recyclé. Concernant la chaîne d'acquisition (voir Figure 8.4), elle est constituée de l'enceinte climatique où est installée la plante, de deux capteurs de références (un thermocouple de type T pour la mesure de la température et un fluxmètre pour la mesure des densités de flux thermique à l'intérieur de l'enceinte) et de deux fils (un constitué de cuivre pour la borne positive de mesure et un autre d'un alliage cuivre-nickel pour la borne négative de mesure de la tension) dont l'un sera enfoui au sol (le fil en cuivre-nickel) et l'autre (le fil en cuivre) inséré dans la tige de la plante (voir les Figures 8.5 et 8.6). Tous ces capteurs sont ensuite reliés à une CR6 (centrale d'acquisition ayant une résolution de signal d'environ 0.05 V et pouvant mesurer des signaux négatifs) qui est à son tour connectée à un ordinateur permettant de récolter les données de mesure. La centrale d'acquisition est en dehors de l'enceinte climatique. S'agissant de la mesure de l'humidité relative, une autre centrale de type Arduino UNO, cette fois-ci à l'intérieur de l'enceinte, ayant une précision de 4.9 mV et ne pouvant mesurer que des tensions positives, est reliée à un capteur de type BME/BMP280 pour la mesure de l'humidité relative ambiante avec une précision de +/- 3%.

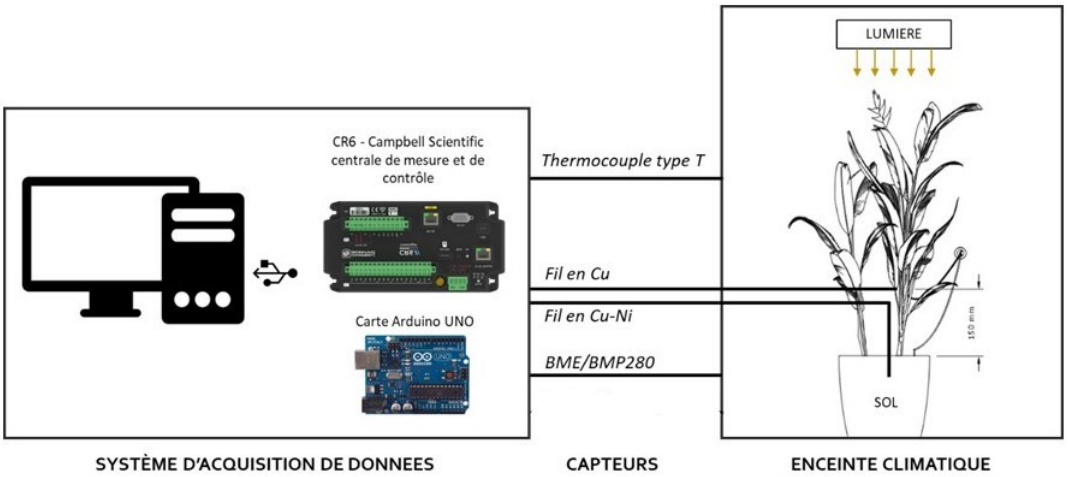

Fig. 8.4.: Chaîne d'acquisition de l'expérimentation

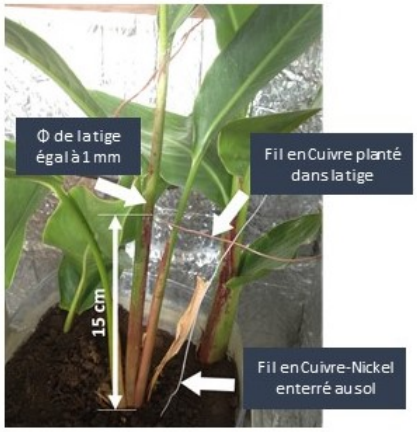

Fig. 8.5.: Positionnement des fils de mesure du signal de la plante : un fil d'alliage cuivre-nickel enterré au sol et un autre constitué uniquement de cuivre piqué à la tige de la plante.

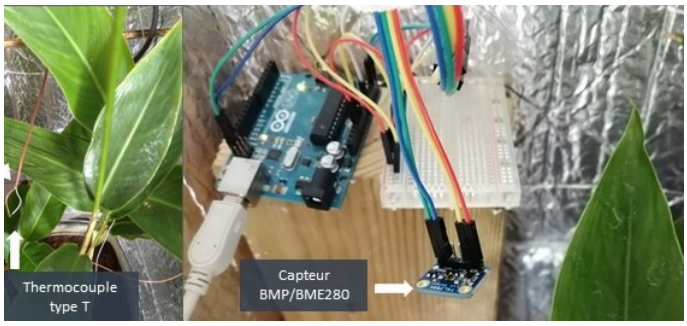

Fig. 8.6.: Positionnement des capteurs de mesures de références sur l'ambiance intérieure : un thermocouple de type T pour la mesure de température et un capteur BMP/BME280 pour la mesure de l'humidité relative.

8.3 Résultats des travaux scientifiques réalisés

Les résultats de tests de mesure sur les six plantes sélectionnées à Madagascar montrent que nous avons bien une différence de potentiel électrique entre le sol et la plante (voir Figure 8.7).

Fig. 8.7.: Valeurs mesurées du signal sur les six plantes sélectionnées en milieu in situ

Cette phase d'identification des paramètres influençant le signal électrique d'une plante en milieu in situ a été également l'occasion de mettre en évidence une propriété connue dans la littérature scientifique et très importante en électrophysiologie des plantes. En effet, nous avons pu constater que la loi additive d'un circuit électrique en série pouvait être appliquée sur les plantes. Ainsi, en prenant l'exemple des robinia reliés en série (voir Figure 8.8) ayant une tension individuelle d'environ 20 mV, nous obtenons une tension additive du signal produit par la mise en série de ces plantes de même nature d'environ 1776 mV, soit à peu près dix fois la tension de la plante, qui correspond au nombre exact de pots de robinia mis en série dans cette expérience. La plante se comporte donc comme un générateur de tension obéissant aux règles fondamentales de circuit électrique en série.

Fig. 8.8.: Mesure sur un montage en série de 10 pots de robinia

Afin de nous assurer d'avoir des échantillons de mesures représentatifs de la réalité, nous avons effectué des mesures in situ sur trois instants différents de la journée et sur plusieurs journées durant le mois de novembre et décembre 2019 : le soir, à l'aube et à midi. Le protocole de mesure, dans cette étape d'identification des paramètres influents, a été le suivant :

— Etape 1 : Sélection de la plante ou de l'arbre à étudier ;
— Etape 2 : Choix des électrodes à utiliser ;
— Etape 3 : Mise en place des électrodes (enfouissement au sol et enfichage dans le tronc ou la tige) ;
— Etape 4 : Raccordement des électrodes au multimètre ;
— Etape 5 : Lecture des résultats, sur cinq secondes (car signal instantané) ;
— Etape 6 : Prise de notes et de photos ;
— Etape 7 : Débranchement du circuit et retour à l'étape une.

L'interprétation des résultats est réalisée grâce à des outils d'analyse de données en composantes principales proposés sous Excel. Le choix de l'utilisation de cet outil est justifié par sa capacité à traiter simultanément un nombre quelconque de variables quantitatives et d'en générer des graphes de corrélation pouvant servir d'interprétation. Les différents calculs nécessaires à l'exécution de l'analyse en composantes principales ont été réalisés à l'aide d'un module complémentaire de la suite bureautique Microsoft Office EXCEL nommé XLSTAT. La matrice des résultats de la Figure 8.3, intégrée dans XLSTAT, nous donne le résultat du Tableau 8.5 des corrélations entre les paramètres (ou variables) de notre expérimentation.

Variables	Circonférence du tronc	Indice foliaire	Humidité	σ anode	σ cathode	Eclairement lumineux	DDP
Circonférence du tronc	**1**	-0,0290	0,0635	-0,5235	-0,2037	-0,0795	0,3532
Indice foliaire	-0,0290	**1**	-0,9862	-0,3967	-0,2339	0,7615	0,7108
Humidité	0,0635	-0,9862	**1**	0,3994	0,2581	-0,8021	-0,7090
σ anode	-0,5235	-0,3967	0,3994	**1**	-0,3059	-0,5000	-0,2988
σ cathode	-0,2037	-0,2339	0,2581	-0,3059	**1**	-0,3231	-0,7583
Eclairement lumineux	-0,0795	0,7615	-0,8021	-0,5	-0,3231	**1**	0,7518
DDP	0,3532	0,7108	-0,7090	-0,2988	-0,7583	0,7518	**1**

Tab. 8.5.: Matrice des corrélations

Cette matrice regroupe les coefficients de corrélation calculés pour chaque paire des sept variables que nous avons déclarées, à savoir la circonférence du tronc, l'indice foliaire, l'humidité, l'anode, la cathode, l'éclairement énergétique lumineux et la Différence De Potentielle (DDP). Elle est symétrique et porte des coefficients pouvant aller de -1 à +1.

En rouge, nous avons un coefficient de corrélation de -0,7090 qui nous laisse à penser que la valeur de la DDP évolue inversement à celle de l'humidité du sol. Par contre, en vert, le

coefficient de 0,7108 nous indique que la différence de potentiel s'accroît en fonction de l'augmentation de l'indice foliaire.

XLSTAT génère le graphe des variables (Figure 8.9), qui nous permet d'interpréter les relations existantes entre nos paramètres. Plus le paramètre se rapproche du cercle, plus son interprétation sera précise.

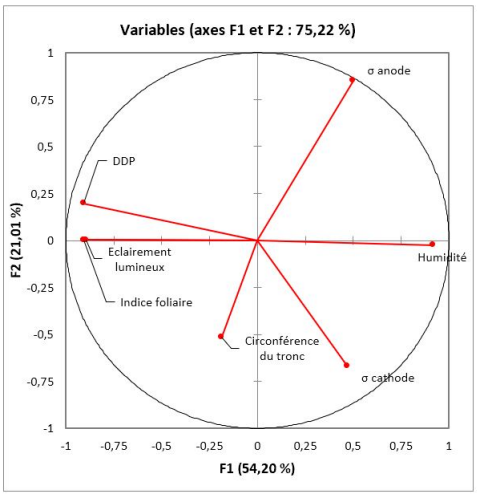

Fig. 8.9.: graphe des variables

La corrélation entre deux paramètres se déduit alors à l'aide de l'angle formé par ces derniers dans la Figure 8.9 :

1. Si l'angle entre deux paramètres de la figure est proche de 0, alors les deux variables sont corrélées positivement ;
2. Si l'angle entre deux paramètres avoisine 90°, il n'y a pas de corrélation entre ces deux paramètres ;
3. Par contre, si l'angle entre deux paramètres est voisin de 180° alors ces paramètres sont considérés comme étant fortement corrélés négativement.

En interprétant le cercle de corrélation donné dans la Figure 8.9, nous pouvons donc en déduire que :

- La Différence De Potentiel (DDP) est positivement corrélée à la fois à l'éclairement lumineux et à l'indice foliaire. Une plante produit donc un signal élevé lorsqu'elle est exposée au flux lumineux, mais également lorsqu'elle est constituée de feuillage assez dense ;
- L'humidité est en corrélation négative avec la DDP. Cela démontre que plus le sol où est enfouie la cathode est humide, moins la plante génère une différence de potentiel électrique. Effectivement, l'eau pure ou la pluie servant à nourrir les plantes est peu conductrice d'électricité car elle ne contient que très peu de particules chargées électriquement ;

- La circonférence du tronc de la plante et la conductivité électrique de la cathode sont assez éloignées du cercle de corrélation. A ce stade d'étude, nous ne pouvons donc pas interpréter leur rôle dans l'étude électrophysiologique de la plante ;
- La conductivité électrique de l'anode n'est pas corrélée aux autres paramètres.

Nous avons tenté d'identifier, à partir de tests expérimentaux, les sollicitations météorologiques qui influent le plus sur la variation du signal de la plante par une approche d'étude de composantes principales et il en ressort que le signal électrique qu'émet la plante est fortement corrélé par l'éclairement lumineux et l'humidité relative du milieu environnant. Nous avons également constaté que les dimensions de la plante (hauteur, nombre de feuilles, diamètre du tronc ou de la tige, etc.) peuvent être considérées comme des paramètres importants dans notre analyse systémique et, de ce fait, doivent être étudiées en profondeur lors de notre approche plus détaillée de modélisation.

Une première approche de modélisation, à partir de bases de connaissances, serait alors de déterminer des coefficients d'ajustement du signal, qui permettraient de fournir la valeur physique exacte de la variable météorologique que nous souhaitons mesurer. Pour cela, les expériences en laboratoire, menées sur l'enceinte climatique, vont nous permettre d'analyser cette piste de recherche.

Le site expérimental est celui de la salle expérimentale du laboratoire PIMENT située dans la ville du Tampon. Plusieurs essais ont été effectués, mais nous avons retenu comme plus significatifs les résultats d'une expérience effectuée dans un environnement ouvert (c'est-à-dire sans ouverture à l'une des façades de l'enceinte). Les deux centrales d'acquisition (CR6 et Arduino UNO) ont été configurées de sorte à enregistrer les valeurs mesurées avec un pas de temps de l'heure pour une scrutation à la minute. Durant cette période, la température ambiante varie de 15°C à 21°C pour une amplitude du signal qui varie entre 207 µV et 649 µV. S'agissant de l'humidité durant cette même période, nous avons une variation de 58% à 81% pour le même signal obtenu auparavant (c'est-à-dire variant entre 207 µV et 649 µV).

Les courbes de la Figure 8.10 et de la Figure 8.11 représentent les résultats de ces variations durant la semaine du 31 juillet au 03 août 2020. La Figure 8.10 illustre la variation du signal électrique de la plante en fonction de la température sur un intervalle de temps de 1h. La Figure 8.11 nous montre quant à elle celle de la variation de ce même signal en fonction cette fois-ci de l'humidité relative.

Nous observons une linéarité entre les valeurs du signal de la plante et les deux variables climatiques (température et humidité relative de l'air ambiant), qui nous intéresse sur cette courte plage de mesure. Une autre remarque importante est que l'amplitude du signal décroît lorsque la température et l'humidité croissent et vice versa. Une base de données assez conséquente (sur une année complète par exemple) permettrait de mettre

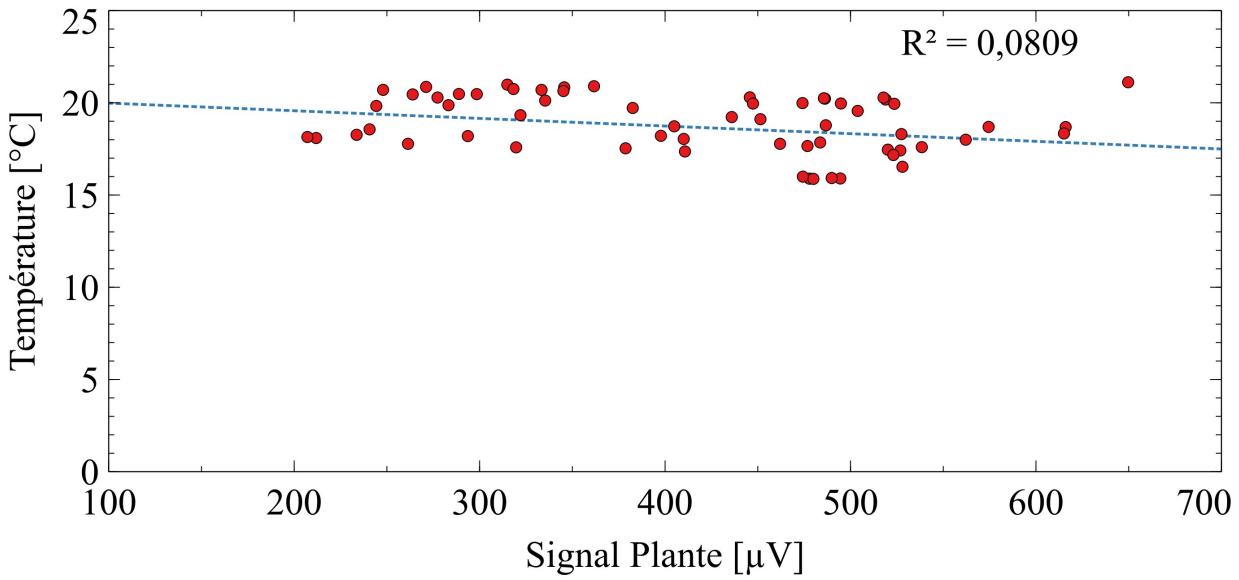

Fig. 8.10.: Variation du signal de la plante en fonction de la température de l'air ambiant

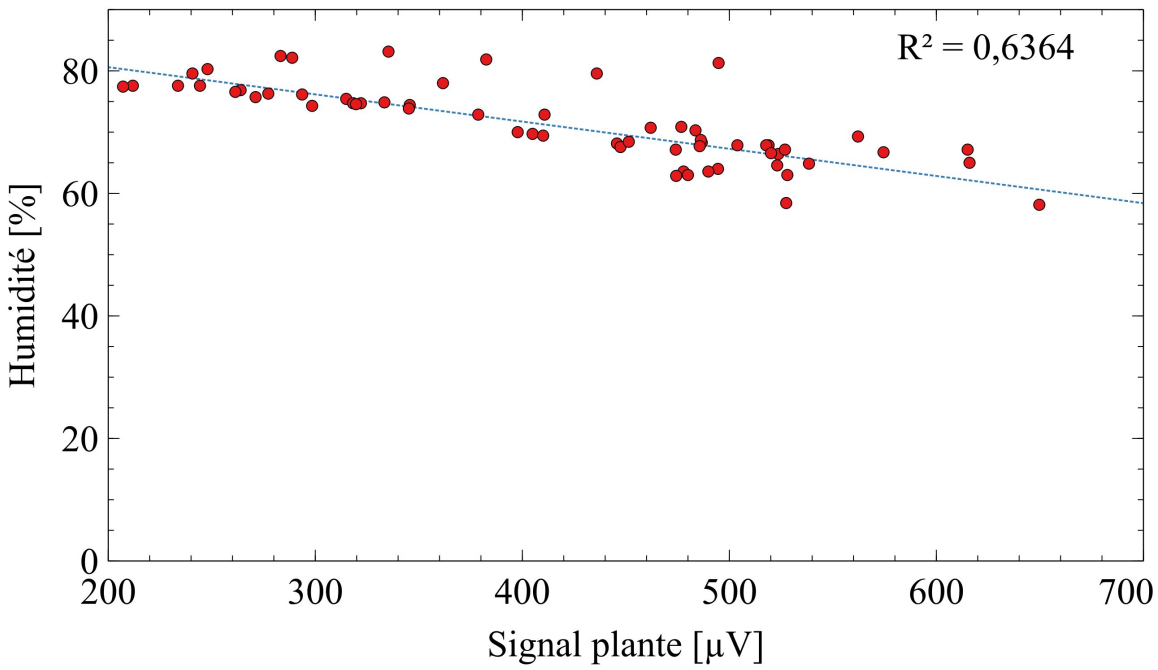

Fig. 8.11.: Variation du signal de la plante en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant

en place les deux modèles associés à ce signal afin que le biocapteur puisse se comporter comme un thermo-hygromètre classique de mesure de l'ambiance intérieure.

8.4 Publications, projets/financements et brevet associés au sujet 6

- Publications revues de rang A :
  1. [$B11$] : , M. V. Randriamandimbisoa, N A. M. N. Razafindralambo, **D. A. H. Fakra**, D. L. Ravoajanahary, J. C. Gatina, Nicole Jaffrezic-Renault, Electrical response of plants to environmental stimuli : a short review and perspectives in meteorological applications, Sensors Internationnal Journal, Elsevier, soumis le 11/08/20.
- Brevet national :
  1. [$Brevet3$] : **Damien Fakra**, Mirantsoa Volana Randriamandimbisoa, Jean Claude Gatina, biocapteur au service du confort humain intérieur. Brevet en cours
- Projet/Financements :
  1. [$F13$] : Un stage de recherche sur un projet ERASMUS entre l'IST d'Antananarivo et l'université de la Réunion en 2020.
- Autres : documents internes, fascicules, rapports, etc. :
  1. [$Document8$] : M. V. Randriamandimbisoa, **D. Fakra**, conception d'une enceinte climatique dédiée aux études des biocapteurs de type totem intérieur, rapport technique interne du laboratoire PIMENT, 2020, Université de la Réunion.

Sélection synthétique de la bibliographie sur le sujet 6 : Biocapteur

[AB72] A. Q. ANSARI et D. J. F. BOWLING. „Measurement of the trans-root electrical potential of plants grown in soil“. en. In : *New Phytol* 71.1 (jan. 1972), p. 111-117 (cf. p. 104).

[Bei19] M. J. BEILBY. „Chara braunii genome : a new resource for plant electrophysiology“. en. In : *Biophysical Reviews* 11.2 (avr. 2019), p. 235-239 (cf. p. 103).

[BYZ15] Siti Nora BASIR, Hanafiah YUSSOF et Nur Ismarrubie ZAHARI. „Simulation Analysis of Mimosa Pudica Main Pulvinus Towards Biological Tactile Sensing Modelling“. en. In : *Procedia Computer Science* 76 (2015), p. 425-429 (cf. p. 104).

[Cha+14] Shre Kumar CHATTERJEE, Sanmitra GHOSH, Saptarshi DAS et al. „Forward and inverse modelling approaches for prediction of light stimulus from electrophysiological response in plants“. en. In : *Measurement* 53 (juil. 2014), p. 101-116 (cf. p. 103).

[Cha+97] Arthur CHAPPELKA, James RENFRO, Greg SOMERS et Bruce NASH. „Evaluation of ozone injury on foliage of black cherry (Prunus serotina) and tall milkweed (Asclepias exaltata) in Great Smoky Mountains National Park“. en. In : *Environmental Pollution* 95.1 (jan. 1997), p. 13-18 (cf. p. 104).

[Che+16] Yang CHEN, Dong-Jie ZHAO, Zi-Yang WANG et al. „Plant Electrical Signal Classification Based on Waveform Similarity“. en. In : *Algorithms* 9.4 (déc. 2016). Number : 4 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 70 (cf. p. 103).

[EK03] A. A. EL-KHATIB. „The response of some common Egyptian plants to ozone and their use as biomonitors“. en. In : *Environmental Pollution* 124.3 (août 2003), p. 419-428 (cf. p. 104).

[FL07] Jörg FROMM et Silke LAUTNER. „Electrical signals and their physiological significance in plants : Electrical signals in plants“. en. In : *Plant, Cell & Environment* 30.3 (mar. 2007), p. 249-257 (cf. p. 104).

[Fur+07] C. M. FURLAN, R. M. MORAES, P. BULBOVAS et al. „Psidium guajava ‘Paluma’ (the guava plant) as a new bio-indicator of ozone in the tropics“. en. In : *Environmental Pollution*. Air Pollution and Climate Change : A Global Overview of the Effects on Forest Vegetation 147.3 (juin 2007), p. 691-695 (cf. p. 104).

[GH09] Luis A. GUROVICH et Paulo HERMOSILLA. „Electric signalling in fruit trees in response to water applications and light–darkness conditions“. en. In : *Journal of Plant Physiology* 166.3 (fév. 2009), p. 290-300 (cf. p. 104).

[Gib+06] Dominique GIBERT, Jean-Louis LE MOUËL, Luc LAMBS, Florence NICOLLIN et Frédéric PERRIER. „Sap flow and daily electric potential variations in a tree trunk“. en. In : *Plant Science* 171.5 (nov. 2006), p. 572-584 (cf. p. 104).

[Hao+17] Zhibin HAO, Wenbin LI, Jiangming KAN, Junguo ZHANG et Guozhu WANG. „Internal resistance of a tree-based power source“. In : *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 9.6 (nov. 2017). Publisher : American Institute of Physics, p. 063104 (cf. p. 104).

[Hao+18] Zhibin HAO, Kai LIU, Wenbin LI et al. „Effects of electrode size on the voltage of a tree-based energy generator“. en. In : *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 10.4 (juil. 2018), p. 043101 (cf. p. 104).

[Hil+12] Adrian HILLS, Zhong-Hua CHEN, Anna AMTMANN, Michael R. BLATT et Virgilio L. LEW. „OnGuard, a Computational Platform for Quantitative Kinetic Modeling of Guard Cell Physiology“. en. In : *Plant Physiology* 159.3 (juil. 2012). Publisher : American Society of Plant Biologists Section : CELL BIOLOGY AND SIGNAL TRANSDUCTION, p. 1026-1042 (cf. p. 103).

[Him10] Carlton HIMES. „Using plants for directly powering nanoelectronic circuits“. en. In : *Nanotechnology Perceptions* 6.1 (mar. 2010), p. 29-40 (cf. p. 104).

[Kar+95] G. Pihl KARLSSON, G. SELLDÉN, L. SKÄRBY et H. PLEIJEL. „Clover as an indicator plant for phytotoxic ozone concentrations : visible injury in relation to species, leaf age and exposure dynamics“. en. In : *New Phytologist* 129.2 (1995). _eprint : https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.1995.tb04306.x, p. 355-365 (cf. p. 104).

[KDT] Elżbieta KRÓL, Halina DZIUBIŃSKA et Kazimierz TRĘBACZ. „What do plants need action potentials for?“ en. In : (), p. 26 (cf. p. 103).

[KSW00] András KOPPÁN, László SZARKA et Viktor WESZTERGOM. „Annual fluctuation in amplitudes of daily variations of electrical signals measured in the trunk of a standing tree“. en. In : *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie* 323.6 (juin 2000), p. 559-563 (cf. p. 104).

[Lau+05] Silke LAUTNER, Thorsten Erhard Edgar GRAMS, Rainer MATYSSEK et Jörg FROMM. „Characteristics of Electrical Signals in Poplar and Responses in Photosynthesis“. In : *Plant Physiology* 138.4 (août 2005), p. 2200-2209 (cf. p. 104).

[LMGP10] Jean-Louis LE MOUËL, Dominique GIBERT et Jean-Paul POIRIER. „On transient electric potential variations in a standing tree and atmospheric electricity“. en. In : *Comptes Rendus Geoscience* 342.2 (fév. 2010), p. 95-99 (cf. p. 104).

[Loc+19] Danilo LOCONSOLE, Giacomo COCETTA, Piero SANTORO et Antonio FERRANTE. „Optimization of LED Lighting and Quality Evaluation of Romaine Lettuce Grown in An Innovative Indoor Cultivation System“. en. In : *Sustainability* 11.3 (jan. 2019). Number : 3 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 841 (cf. p. 104).

[LZM08] Christopher J. LOVE, Shuguang ZHANG et Andreas MERSHIN. „Source of Sustained Voltage Difference between the Xylem of a Potted Ficus benjamina Tree and Its Soil“. en. In : *PLOS ONE* 3.8 (août 2008). Publisher : Public Library of Science, e2963 (cf. p. 104).

[Mai+10] Heiko MAISCHAK, Matthias R. ZIMMERMANN, Hubert H. FELLE, Wilhelm BOLAND et Axel MITHÖFER. „Alamethicin-induced electrical long distance signaling in plants“. In : *Plant Signaling & Behavior* 5.8 (août 2010). Publisher : Taylor & Francis _eprint : https ://doi.org/10.4161/psb.5.8.12223, p. 988-990 (cf. p. 104).

[Mor+02] R. M MORAES, A KLUMPP, C. M FURLAN et al. „Tropical fruit trees as bioindicators of industrial air pollution in southeast Brazil“. en. In : *Environment International* 28.5 (nov. 2002), p. 367-374 (cf. p. 104).

[Mor+15] S. MOROSI, M. DOLFI, E. DEL RE et al. „A WSN for ground-level ozone monitoring based on plant electrical activity analysis“. In : *2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. ISSN : 2376-6506. Août 2015, p. 715-720 (cf. p. 104).

[MVJ08] Vladislav S. MARKIN, Alexander G. VOLKOV et Emil JOVANOV. „Active movements in plants“. In : *Plant Signaling & Behavior* 3.10 (oct. 2008). Publisher : Taylor & Francis _eprint : https ://doi.org/10.4161/psb.3.10.6041, p. 778-783 (cf. p. 104).

[ORO15] Theoharis OUZOUNIS, Eva ROSENQVIST et Carl-Otto OTTOSEN. „Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism : A Review“. en_US. In : *HortScience* 50.8 (août 2015), p. 1128-1135 (cf. p. 104).

[SAS17] Ekaterina SUKHOVA, Elena AKINCHITS et Vladimir SUKHOV. „Mathematical Models of Electrical Activity in Plants“. en. In : *J Membrane Biol* 250.5 (oct. 2017), p. 407-423 (cf. p. 103).

[Su+15] Bin SU, Shu GONG, Zheng MA, Lim Wei YAP et Wenlong CHENG. „Mimosa-Inspired Design of a Flexible Pressure Sensor with Touch Sensitivity“. In : *Small* 11.16 (2015), p. 1886-1891 (cf. p. 104).

[Suk+11] Vladimir SUKHOV, Vladimir NERUSH, Lyubov ORLOVA et Vladimir VODENEEV. „Simulation of action potential propagation in plants“. en. In : *Journal of Theoretical Biology* 291 (déc. 2011), p. 47-55 (cf. p. 103).

[Suk+13] Vladimir SUKHOV, Elena AKINCHITS, Lyubov KATICHEVA et Vladimir VODENEEV. „Simulation of Variation Potential in Higher Plant Cells“. en. In : *The Journal of Membrane Biology* 246.4 (avr. 2013), p. 287-296 (cf. p. 103).

[Suk+16] Vladimir SUKHOV, Lyubov SUROVA, Ekaterina MOROZOVA, Oksana SHERSTNEVA et Vladimir VODENEEV. „Changes in H+-ATP Synthase Activity, Proton Electrochemical Gradient, and pH in Pea Chloroplast Can Be Connected with Variation Potential“. English. In : *Frontiers in Plant Science* 7 (2016). Publisher : Frontiers (cf. p. 103).

[VAJ07] Alexander G. VOLKOV, Tejumade ADESINA et Emil JOVANOV. „Closing of Venus Flytrap by Electrical Stimulation of Motor Cells“. In : *Plant Signaling & Behavior* 2.3 (mai 2007). Publisher : Taylor & Francis _eprint : https://doi.org/10.4161/psb.2.3.4217, p. 139-145 (cf. p. 104).

[VAS15] Vladimir VODENEEV, Elena AKINCHITS et Vladimir SUKHOV. „Variation potential in higher plants : Mechanisms of generation and propagation“. In : *Plant Signaling & Behavior* 10.9 (sept. 2015), e1057365 (cf. p. 103).

[VB06] Alexander G. VOLKOV et Courtney L. BROWN. „Electrochemistry of Plant Life“. en. In : *Plant Electrophysiology : Theory and Methods*. Sous la dir. d'Alexander G. VOLKOV. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006, p. 437-459 (cf. p. 104).

[VCM09a] Alexander G. VOLKOV, Holly CARRELL et Vladislav S. MARKIN. „Biologically Closed Electrical Circuits in Venus Flytrap“. en. In : *Plant Physiology* 149.4 (avr. 2009). Publisher : American Society of Plant Biologists Section : CELL BIOLOGY AND SIGNAL TRANSDUCTION, p. 1661-1667 (cf. p. 104).

[VCM09b] Alexander G. VOLKOV, Holly CARRELL et Vladislav S. MARKIN. „Molecular Electronics of the Dionaea muscipula trap“. In : *Plant Signaling & Behavior* 4.4 (avr. 2009). Publisher : Taylor & Francis _eprint : https://doi.org/10.4161/psb.4.4.8219, p. 353-354 (cf. p. 104).

[VFM10] Alexander G. VOLKOV, Justin C. FOSTER et Vladislav S. MARKIN. „Signal transduction in Mimosa pudica : biologically closed electrical circuits“. en. In : *Plant, Cell & Environment* 33.5 (2010). _eprint : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-3040.2009.02108.x, p. 816-827 (cf. p. 104).

[Vol+04] Alexander G. VOLKOV, Tanya C. DUNKLEY, Simone A. MORGAN et al. „Bioelectrochemical signaling in green plants induced by photosensory systems“. en. In : *Bioelectrochemistry*. Proceedings of the XVIIth International Symposium on Bioelectrochemistry and Bioenergetics 63.1 (juin 2004), p. 91-94 (cf. p. 104).

[Vol+07] Alexander G. VOLKOV, Maya I. VOLKOVA-GUGESHASHVILI, Courtney L. BROWN-MCGAULEY et Albert J. OSEI. „Nanodevices in nature : Electrochemical aspects“. en. In : *Electrochimica Acta*. NANOSCALE ELECTROCHEMICAL MATERIALS SCIENCEFABRICATION, CHARACTERISATION AND APPLICATION 52.8 (fév. 2007), p. 2905-2912 (cf. p. 104).

[Vol+10a] Alexander G. VOLKOV, Justin C. FOSTER, Talitha A. ASHBY et al. „Mimosa pudica : Electrical and mechanical stimulation of plant movements“. en. In : *Plant, Cell & Environment* 33.2 (2010). _eprint : https ://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1113040.2009.02066.x, p. 163-173 (cf. p. 104).

[Vol+10b] Alexander G. VOLKOV, Justin C. FOSTER, Kara D. BAKER et Vladislav S. MARKIN. „Mechanical and electrical anisotropy in Mimosa pudica pulvini“. In : *Plant Signaling & Behavior* 5.10 (oct. 2010). Publisher : Taylor & Francis _eprint : https ://doi.org/10.4161/psb.5.10.12658, p. 1211-1221 (cf. p. 104).

[Vol12] Alexander G. VOLKOV. *Plant Electrophysiology : Signaling and Responses*. en. Google-Books-ID : OjlffVX665EC. Springer Science & Business Media, mai 2012 (cf. p. 103).

[Vol+13] Alexander G. VOLKOV, Chrystelle L. VILFRANC, Veronica A. MURPHY et al. „Electrotonic and action potentials in the Venus flytrap“. en. In : *Journal of Plant Physiology* 170.9 (juin 2013), p. 838-846 (cf. p. 103).

[Vol+14] Alexander G. VOLKOV, Jada REEDUS, Colee M. MITCHELL et al. „Memory elements in the electrical network of Mimosa pudica L.“ In : *Plant Signaling & Behavior* 9.10 (oct. 2014). Publisher : Taylor & Francis _eprint : https ://doi.org/10.4161/1559232e982029 (cf. p. 104).

[Vol+15] Alexander G. VOLKOV, Eunice K. NYASANI, Avery L. BLOCKMON et Maya I. VOLKOVA. „Memristors : Memory elements in potato tubers“. In : *Plant Signaling & Behavior* 10.10 (oct. 2015), e1071750 (cf. p. 104).

[Vol+16a] Alexander G. VOLKOV, Eunice K. NYASANI, Clayton TUCKETT, Esther A. GREEMAN et Vladislav S. MARKIN. „Electrophysiology of pumpkin seeds : Memristors in vivo“. In : *Plant Signaling & Behavior* 11.4 (avr. 2016). Publisher : Taylor & Francis _eprint : https ://doi.org/10.1080/15592324.2016.1151600, e1151600 (cf. p. 104).

[Vol+16b] Alexander G. VOLKOV, Eunice K. NYASANI, Clayton TUCKETT et al. „Cyclic voltammetry of apple fruits : Memristors in vivo“. en. In : *Bioelectrochemistry* 112 (déc. 2016), p. 9-15 (cf. p. 103).

[Vol+17] Alexander G. VOLKOV, Eunice K. NYASANI, Clayton TUCKETT et al. „Electrotonic potentials in Aloe vera L. : Effects of intercellular and external electrodes arrangement“. en. In : *Bioelectrochemistry* 113 (fév. 2017), p. 60-68 (cf. p. 103).

[VS18] Alexander G. VOLKOV et Yuri B. SHTESSEL. „Electrical signal propagation within and between tomato plants“. en. In : *Bioelectrochemistry* 124 (déc. 2018), p. 195-205 (cf. p. 103).

[Zha+01] J ZHANG, J. A FERDINAND, D. J VANDERHEYDEN, J. M SKELLY et J. L INNES. „Variation of gas exchange within native plant species of Switzerland and relationships with ozone injury : an open-top experiment“. en. In : *Environmental Pollution* 113.2 (juil. 2001), p. 177-185 (cf. p. 104).

[Zha+13] Dong-Jie ZHAO, Zhong-Yi WANG, Jun LI et al. „Recording extracellular signals in plants : A modeling and experimental study“. en. In : *Mathematical and Computer Modelling*. Computer and Computing Technologies in Agriculture 2011 and Computer and Computing Technologies in Agriculture 2012 58.3 (août 2013), p. 556-563 (cf. p. 103).

9 Synthèse des travaux de recherche

*Ma culture scientifique me permet essentiellement d'accompagner les chercheurs des pays du Sud à concevoir des appareils de mesure low-cost respectant les normes et les règles de l'art dans le domaine de la métrologie et permettant ainsi de faire avancer leurs thématiques de recherche appliquée sans pour autant que les aspects financiers ne soit un frein à leurs objectifs de recherche. Je me soucie également de la mise en place d'outils numériques pouvant simuler les cas de figure les plus complexes et ainsi remplacer les études réalisées sur des dispositifs expérimentaux qui seraient difficiles à concevoir ou tout simplement trop onéreux. Les exemples que j'ai choisis pour illustrer mes propos autour de l'approche systémique ont tous un lien avec *l'énergétique* (analyseur de gaz de synthèse et le logiciel SMARTEN) , *l'habitat* (le dispositif qui permet de mesurer les 4 propriétés thermo-physiques d'un matériau de construction et le logiciel CODYRUN) et *l'environnement* (le biocapteur météorologique et le logiciel SIZER). Le raisonnement scientifique que j'aborde est par moment réel, lorsqu'il s'agit de concevoir des prototypes expérimentaux de mesure physique, ou virtuel, lorsque je m'intéresse à des environnements numériques dédiés à des simulations sur des systèmes complexes pour ces pays. Ces recherches ont été menées en collaboration étroite avec différentes institutions dans la zone océan Indien (Madagascar, Comores, Maurice et Afrique du Sud). Je compte élargir mon champ d'application au continent africain. Ma pensée de chercheur est donc guidée par une réelle envie de mettre au profit des pays du Sud le savoir-faire et les techniques expérimentales des pays du Nord, souhaitant mener une recherche de qualité à un coût beaucoup plus abordable. Au final, le fil directeur de mes recherches est articulé autour de l'approche systémique appliquée dans la métrologie.*

Table des matières du chapitre 9

9.1 Synthèse sur les outils de modélisation et de simulation numérique . . . 124

9.2 Synthèse sur la métrologie circulaire de haute précision 124

9.3 Synthèse sur les autres pistes de recherche 126

9.1 Synthèse sur les outils de modélisation et de simulation numérique

Simuler les comportements des systèmes et en particulier ceux appelés complexes a toujours fait partie des grands enjeux de recherche dans le monde. De nombreux outils numériques très évolués ont ainsi pu voir le jour dans plusieurs laboratoires de recherche. Notre laboratoire entre dans cette approche scientifique et développe régulièrement des codes de calcul dédiés aux phénomènes en lien avec l'énergie, l'environnement et la physique du bâtiment. Cinq critères permettent de sélectionner l'environnement de programmation :

— Le niveau de complexité du système étudié (simulation en 1D, 2D ou 3D) ;

— les types de modèles utilisés dans l'étude (analytique, numérique, etc.) ;

— la durée d'exécution de la simulation ;

— le coût financier du langage de programmation ainsi que de la machine qui sera utilisée ;

— afin, la compatibilité avec d'autres code de calculs existants (couplage inter-logiciel, couplage intercode, etc.).

Nous avons développé ou participé au développement de ces outils au sein du laboratoire PIMENT. L'approche systémique envisagée dans ces algorithmes de calcul a rendu le programme plus efficace en temps de calcul, mais également dans la compréhension et la mise en équation des phénomènes très complexes rencontrés (couplage des modèles de nature différente, nombre important de modèles à simuler simultanément, etc.). La plupart d'entre eux sont destinés aux études dans les domaines de l'énergie, l'environnement et les bâtiments et espaces bâtis. Ces logiciels, disposent d'une interface graphique conviviale et simple d'utilisation. En plus d'être utiles en recherche, ces outils sont également proposés dans la formation en enseignement supérieure, mais aussi comme outils d'aide à la décision destinés aux décideurs en maîtrise d'oeuvre et d'ouvrage dans les secteurs d'activité publics et privés (collectivités, communes, bureaux d'études, etc.).

9.2 Synthèse sur la métrologie circulaire de haute précision

Les pays du Nord ont toujours accompagné financièrement et/ou techniquement, à travers leurs expertises, ceux du Sud dans de nombreux domaines de recherche appliquée. Notre démarche s'inscrit dans cette logique. En particulier, nous proposons la

création de nouveaux dispositifs expérimentaux innovants à moindre coût permettant de faire avancer les travaux de recherche de certains laboratoires de ces pays en voie de développement, et ce, dans de nombreux domaines de recherche expérimentale. Notre logique d'approche, basée sur l'analogie systémique, consiste à nous appuyer sur la technologie des appareils existants pour concevoir de nouveaux types de dispositifs à l'aide de matériaux peu coûteux, voire par moment recyclés, dans la limite du possible. Si les conditions ne sont pas réunies pour reproduire l'appareil de mesure souhaité, nous nous tournons vers la conception d'un nouveau type d'appareil en associant des modèles soit existants soit créés en fonction du système qui sera proposé. Des incertitudes de mesure sont calculées afin de s'assurer de la fiabilité des données mesurées et des tests de conformité sont effectués pour nous permettre de valider le fonctionnement du prototype. L'organigramme suivant illustre notre démarche :

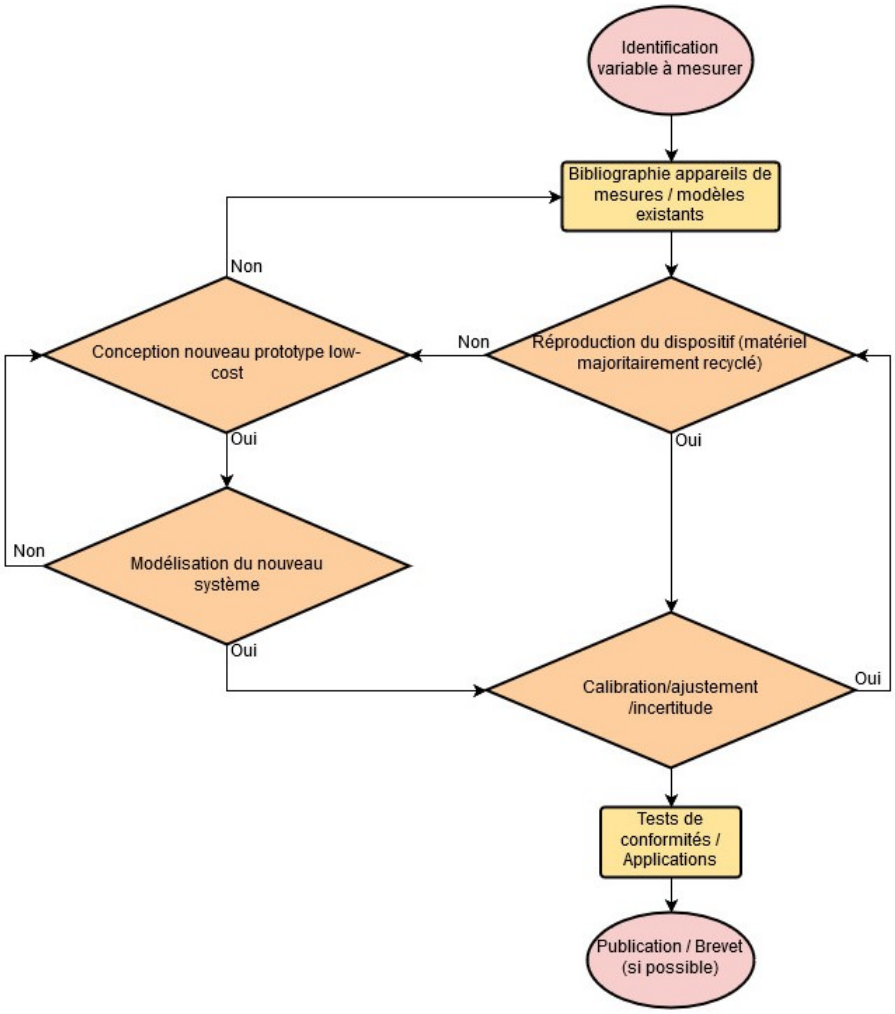

Fig. 9.1.: Synoptique de la démarche en métrologie lowt-cost dédiée à la recherche des pays du Sud

Cette démarche proposée peut s'appliquer pour tout dispositif expérimental utilisé dans chacune des disciplines des sciences dites dures. Il est intéressant de constater qu'au final l'innovation du système produit lors de cette démarche aboutit généralement à

des travaux de recherche tels que la création d'un nouveau modèle, la création d'un nouveau type de capteur de mesure voire la création d'un nouveau système ou dispositif expérimental destiné à la recherche appliquée. Cette démarche nous permet de rédiger de nombreux articles scientifiques et, dans certains cas, à déposer des brevets.

9.3 Synthèse sur les autres pistes de recherche

Le logiciel SMARTEN a besoin d'informations sur les énergies renouvelables du site à étudier, des bases de données météorologiques et des localisations des espaces bâtis à étudier pour fonctionner. Concernant les énergies renouvelables, nous n'avons pas pu obtenir d'informations sur des données fiables aux Comores afin de préparer les futures simulations, sur notre logiciel, dans cette région. Un état de l'art sur les sources d'énergie existantes aux Comores ainsi que les perspectives futures de développement de ces énergies dans ce pays ont été réalisés ([B10]].

S'agissant des études sur l'enveloppe du bâtiment, j'ai participé à de nombreux travaux de recherche en lien avec la performance énergétique d'un système bâti intégrant des matériaux de construction innovants tels que les matériaux dits à "produits minces réfléchissants ou PMR" [B04], les panneaux photovoltaïques intégrés dans l'enveloppe du bâtiment ou BIPV (Building Integrated Photovoltaic panel) [B01] ou encore, tout récemment, l'intégration des systèmes dits de "puits de lumière" dans la structure de l'habitat [B06] en zone tropicale humide.

Et enfin, je travaille sur une nouvelle thématique transdisciplinaire en lien avec la récupération d'énergie des routes, ponts et chaussées. Un état de l'art a été réalisé et un nouveau modèle hybride de coulage thermo-piezo-électrique est en cours d'élaboration ainsi que sa validation expérimentale ([B14], [B16] et [B17]). Cette thématique de recherche s'inscrit dans le cadre d'un partenariat entre des chercheurs de l'université de Pretoria (école d'ingénieur en Génie Civil), des collègues de l'IST d'Antananarivo (école d'ingénieur en Génie Industriel) et des chercheurs de notre laboratoire.

Dans l'ensemble, ces travaux de recherche visent à faciliter et à développer des solutions rapides, efficaces et réellement innovantes pour améliorer des dispositifs expérimentaux ou prototypes et proposer de nouveaux modèles, associés aux systèmes, tout en tenant compte des champs transdisciplinaires en lien avec l'énergie, le génie civil et l'environnement.

Thématique	Encadrements	Production scientifique	Mots clés	Références articles	Observations
Analyseur de gaz combustible	-Doctorat :1	-Publications :2 -Brevet :1	Syngaz, analyseur de gaz, low cost, hydrogène, méthane, capteur, arduino, expérimentation, métrologie	[B08] et [B13]	+1 brevet national ([Brevet2])
Mesure thermo-optico-physique des matériaux de construction	-Master :2 -Ingénierie :1	-Publications :2 -Brevet :1	Absorptance, Reflectance, Transmittance, Conductivité thermique, Low cost, expérimentation, polycarbonate, métrologie	[B07] et [B09]	+1 brevet national ([Brevet1]) ; +1 bourse CIFRE en cours d'évaluation.
Biocapteur dédié au microclimat	-Ingénierie :2	-Publications :2 -Brevet :1	Biocapteur, plante, signal électrique, modélisation, expérimentation, validation application, métrologie, météorologie	[B11] et [B15]	+1 brevet national en cours ; +1 bourse CIFRE en cours d'évaluation ; +1 projet ANR en cours de soumission.
SMARTEN : logiciel de pilotage multi-échelle du mix énergétique	-Master :1 -Ingénierie :1 -Doctorat :3	-Publications :2 -Conférences :2	Pilotage, mix-énergétique, simulation, multi-échelle, réseau intelligent, espace bâti	[A05], [B12], [C19] et [C20]	+1 bourse CIFRE en cours d'évaluation.
CODYRUN : logiciel de simulation photométrique dans le bâtiment	-Master :5	-Publications :6 -Conférences :4 -Congrès :2	Eclairement lumineux, gisement solaire, Efficacité lumineuse, simulation, modélisation 3D, validation, application	[A04], [A03], [CB02], [B03], [B05], [B06], [C02], [C06], [C07], [C09], [C10], [C11] et [E13]	+1 projet Régional ([F01])
SIZER : logiciel de dimensionnement d'un gazogène	-Master :2 -Ingénierie :2 -Doctorat :3	-Publications :1 -Conférences :2	Optimisation, simulation numérique, gazogène à lit fixe, déchets, modélisation	[B18], [C17] et [C18]	+ 1 projet FEDER en cours [F06] ; + 3 projets interne à l'université : [F04], [F07] et [F06].

Tab. 9.1.: Synthèse des six thématiques de recherche abordées dans le manuscrit

Deuxième partie

Synthèse des enseignements et encadrements

Le contenu des enseignements dispensés et des encadrements réalisés de 2006 à 2020 sera détaillé dans cette partie.

Table des matières de la deuxième partie

10 Postes occupés en enseignement supérieur **131**

10.1 Vacataires à l'université de la Réunion (2005-2007) 131

10.2 A.T.E.R à l'université de la Réunion (2007-2010) 131

10.3 Vacataires à l'université de la Réunion (depuis 2010) 132

10.4 Enseignement et expertise dans la zone océan Indien 133

11 Encadrements sur des travaux de recherche **135**

11.1 En Master 135

11.2 En Cycle d'ingénieur 137

11.3 En Doctorat 138

12 Conclusion de mes activités d'enseignement et d'encadrement **141**

10 Postes occupés en enseignement supérieur

Trois postes occupés durant ma carrière professionnelle m'ont permis de dispenser des enseignements universitaires au sein de l'université de la Réunion et dans deux établissements étrangers (université des Comores et I.S.T d'Antananarivo). Dans ce paragraphe seront détaillées les matières enseignées.

10.1 Vacataires à l'université de la Réunion (2005-2007)

Durant deux années universitaires (2005-2006 puis 2006-2007), j'ai dispensé deux modules au département Génie Civil de l'I.U.T de Saint-Pierre, dans un D.U.T en tant que Chargé d'Enseignement Vacataire (C.E.V) à l'université de la Réunion (voir les détails dans le tableau 10.1).

Département	Libellé du Diplôme	Discipline	TYPE DE COURS			
			CM	TD	TP	HETD
I.U.T (G.C)	D.U.T 1ère année	R.V.D			16	10,67
I.U.T (G.C)	D.U.T 2ème année	Outils de modélisation numérique	6	8		17
		TOTAL				27,67

Tab. 10.1.: Vacation à l'IUT de Saint-Pierre (année 2005-2007)

10.2 A.T.E.R à l'université de la Réunion (2007-2010)

Durant la préparation de mon Doctorat de 3ème cycle, j'ai pu bénéficier de contrats d'enseignant chercheur à l'université de la Réunion. Les Tableaux 10.2, 10.3 et 10.4 synthétisent les départements, les filières, les intitulés, le nombre d'heures ainsi que le type (CM, TD ou TP) de mes enseignements effectués durant mes trois années d'A.T.E.R (de 2007 à 2010) à l'université de la Réunion.

Département	Libellé du Diplôme	Discipline	TYPE DE COURS			
			CM	TD	TP	HETD
S.H.E (S.B.E)	L1	Informatique			60	40
S.H.E (S.B.E)	L2	Mécanique des poutres		8		8
S.H.E (S.B.E)	L2	Mécanique pour les Energies renouvelables		12		12
S.H.E (S.B.E)	L2	Analyse pour la physique		10		10
I.U.T (G.C)	D.U.T 2ème année	Thermique de l'habitat			8	5,33
I.U.T (G.C)	D.U.T 2ème année	Réseaux			8	5,33
I.U.T (G.C)	D.U.T 2ème année	Outil de modélisation	6	8		17
		TOTAL				97,66

Tab. 10.2.: Année 2007-2008 (A.T.E.R à mi-temps = 96 HETD)

Département	Libellé du Diplôme	Discipline	TYPE DE COURS			
			CM	TD	TP	HETD
S.H.E (S.B.E)	L1	Informatique	6		40	35,66
S.H.E (S.B.E)	L2	Mécanique des poutres		8		8
S.H.E (S.B.E)	L2	Mécanique pour les Energies renouvelables		12		12
S.H.E (S.B.E)	L2	Analyse pour la physique		10		10
I.U.T (G.C)	D.U.T 1ère année	Thermique de l'habitat			8	5,33
I.U.T (G.C)	D.U.T 1ère année	Réseaux			8	5,33
S.H.E (S.B.E)	L3	Base de génie climatique	8	20		32
S.H.E (S.B.E)	L3	Topographie			6	4
I.U.T (G.C)	D.U.T 2ème année	Outil de modélisation	6	8		17
S.H.E (S.B.E)	M1	Conception thermique des systèmes	6		12	17
S.H.E (S.B.E)	M1	Conception énergétique des systèmes	8	8		20
S.H.E (S.B.E)	M1	Rappel RDM	8	8		20
S.H.E (S.B.E)	M1	Stage		6		6
		TOTAL				192,33

Tab. 10.3.: Année 2008-2009 (A.T.E.R à temps plein = 192 HETD)

Département	Libellé du Diplôme	Discipline	TYPE DE COURS			
			CM	TD	TP	HETD
S.H.E (S.B.E)	L3	Base de génie climatique	8			12
S.H.E (S.B.E)	L3	Topographie	6	8		17
I.U.T (G.C)	D.U.T 2ème année	Outil de modélisation	6	8		17
S.H.E (S.B.E)	M1	Conception thermique des systèmes	6		12	17
S.H.E (S.B.E)	M1	Conception énergétique des systèmes	8	8		20
S.H.E (S.B.E)	M1	Stage		13		13
		TOTAL				96

Tab. 10.4.: Année 2009-2010 (A.T.E.R à mi-temps = 96 HETD)

10.3 Vacataires à l'université de la Réunion (depuis 2010)

Depuis 2010, j'interviens en tant que Chargé d'Enseignement Vacataire (en heures supplémentaires par rapport à mon temps de travail principal d'ingénieur de l'université de la Réunion) ponctuellement dans les matières données par le Tableau 10.5.

Département	Libellé du Diplôme	Discipline	Années	TYPE DE COURS			
				CM	TD	TP	HETD
S.H.E (S.B.E)	2ème année Master	Génie Climatique II	2011	5	5	10	19,16
S.H.E (S.B.E)	1ère année Master	Génie Climatique I	2012-2014	10	10		25
S.H.E (S.B.E)	1ère année Master	Transfert Thermique	2012-2014	10	10		25
S.H.E (S.T.A.P.S)	2ème année Master	Rédaction Scientifique	2018		20		20
S.H.E (S.B.E)	2ème année Master	Transfert Thermique	2018	4	10		16
S.H.E (S.B.E)	1ère année Master	Système de Gestion des Déchets (bioénergie)	2018-2020	8	10		22
S.H.E (S.B.E)	1ère année Licence	Mécanique des points matériels	2019-2020		12		12
S.H.E (S.B.E)	1ère année Licence	Mécanique des points matériels	2019-2020			28	18,16
S.H.E (S.B.E)	2ème année Licence	Thermodynamique	2019-2020		12		12

Tab. 10.5.: Chargé d'Enseignement Vacataire de 2011 à nos jours

10.4 Enseignement et expertise dans la zone océan Indien

Le département S.B.E de l'UFR S.H.E dont je suis membre cherche à délocaliser ses filières de formation dans la zone océan Indien. Un appui et/ou échange pédagogique est alors proposé aux différentes universités de la zone (Comores, Madagascar, Maurice et Afrique du Sud) à travers des projets de collaborations en recherche et en formation. C'est dans ce cadre qu'il m'a été proposé des missions ponctuelles d'enseignement, d'échange et de renforcement des capacités vers les Comores et Madagascar.

Mes missions d'expertises ont été financées pour la plupart par l'ambassade de France à Moroni (projet CODEV aux Comores) ou/et à travers des projets ERASMUS+ (partenariat entre mon établissement d'origne - l'université de la Réunion - et les établissements bénéficiaires à Madagascar et aux Comores).

Ma première mission pédagogique a eu lieu entre le 05 et 26 juin 2008. J'ai effectué une mission de renforcement des capacités du personnel enseignant au sein de l'université des Comores. Durant cette mission, j'ai dispensé un module à l'I.U.T des Comores, dont l'intitulé est décrit dans le Tableau 10.6.

Département	Libellé du Diplôme	Discipline	Semestre (S1 - S2)	TYPE DE COURS			
				CM	TD	TP	HETD
I.U.T (H.E)	D.U.T 1ère année	Organisation et suivi de chantier	S1	28	8	10	56,67
		TOTAL					56,67

Tab. 10.6.: Mission du 05 juin au 3 juillet 2008 à l'IUT des Comores

Ma seconde mission au sein de ce même établissement a eu lieu entre le 17 décembre 2008 et le 07 janvier 2009. Durant cette période j'ai participé à la mise en place de la maquette de licence en physique du département MPCI (Mathématique, Physique, Chimie et Informatique) et dispensé des modules de formation décrits dans le tableau 10.7.

Département	Libellé du Diplôme	Discipline	Semestre (S1 - S2)	TYPE DE COURS			
				CM	TD	TP	HETD
F.S.T (MPCI)	Licence 1 (S.V)	Mécanique de point matériel	S1	6			09
F.S.T (MPCI)	Licence 1 (S.T.E)	Mécanique de point matériel	S1	6			09
		TOTAL					18

Tab. 10.7.: Mission du 17 décembre 2008 au 07 janvier 2009

Ma troisième mission, qui s'est déroulée du 04 au 30 décembre 2009, une fois encore à l'université des Comores, m'a permis d'enseigner les matières décrites dans le tableau 10.8.

Département	Libellé du Diplôme	Discipline	Semestre (S1 - S2)	TYPE DE COURS			
				CM	TD	TP	HETD
I.U.T (HE)	D.U.T 2ème année	Thermique du bâtiment	S1	12	15	3	35
F.S.T (MPCI)	Licence 1 (S.T.E)	Mécanique des fluides	S1	6		18	21
F.S.T (MPCI)	Licence 1 (S.V)	Mécanique des fluides	S1	6		18	21
		TOTAL					77

Tab. 10.8.: Mission du 04 au 30 décembre 2009

Ma quatrième mission, qui s'est déroulée du 26 février au 11 mars 2020 à l'université des Comores, avait pour objectif d'enseigner les matières décrites dans le tableau 10.9.

Département	Libellé du Diplôme	Discipline	Semestre (S1 - S2)	TYPE DE COURS			
				CM	TD	TP	HETD
F.S.T (MPCI)	Licence 3 année (SEEB)	Transfert thermique	S1	10	10		25
F.S.T (MPCI)	Licence 3 année (SEEB)	Gestion des réseaux fluides	S1	10	10		25
		TOTAL					50

Tab. 10.9.: Mission du 26 février au 11 mars 2020

11 Encadrements sur des travaux de recherche

Depuis 2008, je m'implique dans l'encadrement de plusieurs projets de fin d'année d'étudiants du département S.B.E de l'UFR S.H.E de notre université, mais également provenant d'autres universités et écoles (université de Grenade en Espagne, INSA de Rouen en France, IST d'Antananarivo à Madagascar et université des Comores aux Comores), dans la mesure où les sujets ont de très fortes interactions avec mes enseignements et thèmes de recherche. Dans ce qui va suivre, je ne listerai que les stages en recherche de niveau Master et cycle d'ingénieur (en quatrième et cinquième années) pour lesquels j'ai réalisé l'encadrement soit entièrement soit en coencadrement. Depuis 2018 je participe à des encadrements de niveau doctorat. Les intitulés des sujets ainsi que le pourcentage d'encadrement seront détaillés dans ce paragraphe.

11.1 En Master

Ci-dessus la liste des étudiants en Master dont j'ai participé à l'encadrement depuis 2008 :

1. [D01] Aurélien JEAN, Titre : *Facteurs de formes et langage C : méthode de "Monté Carlo"*, stage de recherche (3 mois) soutenu le **20 juillet 2008**, Université de la Réunion, encadrement : 40%.

2. Muzammil MOOSAFER, Titre : *Mise en place d'une maquette réduite expérimentale dédiée à l'étude du couple thermo – photométrique d'un bâtiment*, stage de recherche (3 mois) soutenu le **11 juillet 2010**, Université de la Réunion, encadrement : 100% (trois articles dans des conférences internationale ont été réalisés)

3. Thomas DIMITRI, Titre : *Modélisation de la similitude en photométrie et en thermique du bâtiment : étude de cas en monozone*, stage de recherche (3 mois) soutenu le **16 juillet 2011**, Université de la Réunion, encadrement : 100%.

4. Garry RIVIERE, Titre : *Proposition d'un outil d'aide à la décision pour l'étude de l'éclairage intérieur d'un bâtiment vis-à-vis de la consommation électrique et du confort visuel,*

stage de recherche (3 mois) soutenu le **11 juillet 2012**, Université de la Réunion, encadrement : 100%.

5. Olivier HOARAU, Titre : *Algorithme numérique et code de calcul sur le couplage inter – logiciel : cas d'étude entre Google SketchUp et CODYRU*N, stage de recherche (3 mois) soutenu le **11 juillet 2012**, Université de la Réunion, encadrement : 100%.

6. Thomas HOARAU, Titre : *Similitude en thermique du bâtiment : cas d'un mono - zone*, stage de recherche (3 mois) soutenu le **11 juillet 2012**, Université de la Réunion, encadrement : 100%.

7. Emilie VEDEAU, Titre : *Protocole expérimental dédié à l'étalonnage et la calibration des capteurs de mesure d'une station météorologique*, stage de recherche (4 mois) soutenu le **15 août 2013**, Université de la Réunion, encadrement : 100%.

8. Julie-Marie TURPIN, Titre : *Proposition d'une maîtrise de l'énergie au sein de la société LOGISTICSUD*, stage en entreprise (3 mois) soutenu le **10 juin 2013**, Université de la Réunion, encadrement : 50%.

9. Michel Ange MONG FOCK, Titre : *Amélioration du confort thermique au sein de l'atelier électrotechnique du lycée Paul Langevin*, stage en entreprise (3 mois) soutenu le **16 juin 2014**, université de la Réunion, encadrement : 50%

10. Cristelle CALIAMA, Titre : *Optimisation de l'isolation d'un bâtiment : cas sur l'île de la Réunion (SODICO)*, stage en entreprise (3 mois) soutenu le **16 juin 2014**, Université de la Réunion, encadrement : 50%

11. Saidali MOUANDHU, Titre : *Étude et suivi des travaux de construction en Génie Civil (CET Mayotte)*, stage en entreprise (3 mois) soutenu le **08 juillet 2019**, Université de la Réunion, encadrement : 50%

12. El-Anbasse HABASSE, Titre : *Conducteur de travaux de construction en Génie Civil (SOGEA Nord-Ouest)*, stage en entreprise (3 mois) soutenu le **09 juillet 2019**, Université de la Réunion, encadrement : 50%

13. Alexandre LAURET, Titre : *Métrologie d'un mini gazéificateur à lit fixe dédié à la production d'électricité à partir des déchets*, stage de recherche (3 mois) soutenu le **09 juillet 2019**, Université de la Réunion, encadrement : 50% (un article dans un conférence internationale)

14. Hamid MOHAMED, Titre : *Modélisation des matériaux à changement de phases*, stage de recherche (6 mois) soutenu le **18 juillet 2008**, Université de la Réunion, encadrement : 30%.

15. Alexis HEINTZ, *Étude du couplage thermo – photométrique en physique du bâtiment : modélisation, expérimentation et validation dans le cas d'un monozone*, stage de recherche (6 mois) soutenu le **18 juillet 2012**, Université de la Réunion, encadrement : 100%.

16. Guillaume DOURGAYA, Titre : *Simulation numérique d'un pilote de gazéification à lit fixe*, stage de recherche (6 mois) soutenu le **13 juillet 2016**, Université de la Réunion, encadrement : 100%.

17. Mohamed Nasroudine Mohamed RACHADI, Titre : *Mise en place d'un outil de pilotage des flux et mix énergétique d'un espace bâti ou système bâti*, stage de recherche (6 mois) soutenu le **14 septembre 2018**. Université de la Lorraine, encadrement : 100%. (deux articles dans une conférence internationale ont été réalisés et deux publications revues en cours)

11.2 En Cycle d'ingénieur

Concernant les apprentis ingénieurs et les ingénieurs, j'ai participé aux encadrements suivants :

1. Azael PEREZ MENDEZ ANDRES, Titre : *Modélisation thermo-aéraulique urbaine du Campus Sud du Tampon (Université de la Réunion)*, stage de recherche (4 mois) soutenu le **17 juillet 2018**. Université de Grenade (ERASMUS), encadrement : 100%.

2. Javier CACERES LOBOS, Titre : *Optimisation de forme d'un mini gazogène dédié à la production de l'électricité*, stage de recherche (4 mois) soutenu le **17 juillet 2018**. Université de Grenade (ERASMUS), encadrement : 100%. (deux articles dans deux congrès internationaux ont été réalisés)

3. Jesus CHIAS ROMEO, Titre : *Modélisation fonctionnelle hydraulique et biochimique d'une station de traitement des eaux usées*, stage de recherche (4 mois) soutenu le **17 juillet 2018**. Université de Grenade (ERASMUS), encadrement : 100%.

4. Alfonso José BLAZQUEZ RECIO, Titre : *New concept and reliability degree of a system measuring four thermo-physic properties of complex materials*, stage de recherche (4

mois) soutenu le **11 juillet 2019**. Université de Grenade (ERASMUS), encadrement : 100% (deux publications revues de rang A acceptées et un brevet national déposé).

5. Justine ABGRALL, Titre : *Instrumentation d'un mini-gazéificateur et validation du logiciel d'optimisation énergétique SIZER*, stage de recherche (3 mois) soutenu le **03 octobre 2019**, INSA de Rouen, encadrement : 100% (une publication revue en cours).

6. Dolly Armel Sylvain ANDRIATOAVINA, Titre : *Modélisation, Performances d'un moteur à allumage commandé alimenté en gaz de synthèse enrichi en hydrogène : phase de modélisation*, (6 mois) du **01 avril au 30 septembre 2019**. Institut Scientifique de Technologie d'Antananarivo (ERASMUS+), encadrement : 100% (un article accepté à la conférence internationale SEEP2019).

7. Ando Ny Aina RANDRIANTSOA, *Récupération de l'énergie des chaussées, des ponts et des routes à travers un système hybride thermo-piézoélectrique*. stage de recherche (4 mois) soutenu le **15 mai 2020**. Institut Scientifique de Technologie d'Antananarivo (ERASMUS+), encadrement : 100% (deux publications revues de rang A sont en cours, un article dans une conférence publiée et une publication revue acceptée).

8. Domoina Lucia RAVOAJANAHARY, *Étude bibliographique des biocapteurs dédiés à la météorologie des microclimats (intérieur et extérieur)*, stage de recherche (4 mois) soutenu le **15 mai 2020**. Institut Scientifique de Technologie d'Antananarivo (ERASMUS+), encadrement : 100% (une publication revue de rang A en cours).

9. Mirantsoa Volana RANDRIAMANDIMBISOA, Titre : *Modélisation, conception et validation d'un biocapteur dédié à la météorologie*, stage de recherche (6 mois) du **01 décembre 2019 au 31 mai 2020**. Institut Scientifique de Technologie d'Antananarivo (ERASMUS+), encadrement : 100% (deux publications revues de rang A en cours d'évaluations et un brevet en cours).

10. Dolly Armel Sylvain ANDRIATOAVINA, Titre : *Performances d'un moteur à allumage commandé alimenté en gaz de synthèse enrichi en hydrogène : phase d'expérimentation et de validation*, stage de recherche (6 mois) soutenu le **15 juillet 2020**. Institut Scientifique de Technologie d'Antananarivo (ERASMUS+), encadrement : 100% (1 publication revues de rang A acceptée, 1 article revue en cours d'évaluation et un brevet déposé).

11.3 En Doctorat

De 2010 à 2015, j'ai participé (non officiellement) à trois coencadrements de thèses de notre laboratoire au sein de l'équipe Physique du Bâtiment ou PhyBât (ancien pôle de

recherche du laboratoire Physique du Bâtiment et des Systèmes ou LPBS). Je ne reporterai ici que les encadrements les plus récents et officialisés. Mes activités scientifiques se traduisent donc par la participation à l'encadrement de cinq thèses, dont deux soutenues et trois en cours, qui sont les suivantes :

1. El Assad NIDHOIMI, intitulé de la thèse : *Description et analyse du fonctionnement énergétique des espaces bâtis. Mise en oeuvre systémique du bilan carbone associé*, soutenue le **19 juillet 2018** à l'Université de la Réunion, Directeur de thèse : Jean Claude GATINA, coencadrement : 50% (j'ai été membre du jury de thèse)

2. Manitra Pierrot RANJARANIMARO, intitulé de la thèse : *Évaluation de la qualité environnementale, du fonctionnement énergétique des espaces bâtis à Madagascar*, soutenue le **28 février 2019**, en Cotutelle entre l'Université de la Réunion et l'Université d'Antsiranana, Madagascar. Directeurs de thèse : Jean Claude GATINA et Jean Marie RAZAFIMAHENINA, coencadrement : 30% (j'ai été membre du jury de thèse)

3. Monsieur Dolly ANDRIATOAVINA, intitulé de la thèse : *Influence de l'ajout de HHO sur les performances d'un moteur à allumage commandé et alimenté en gaz de synthèse*, Soutenance de thèse prévue vers la **mi-décembre 2020** à l'Université d'Antananarivo, Madagascar. Directeur de thèse : José ANDRIAMAMPIANINA, codirection : 40%.

4. Monsieur Mzé Ali BACAR, intitulé de la thèse : *Caractérisation et valorisation industrielle des matériaux argileux de la région sud de l'île de Ngazidja en union des Comores*, soutenance de thèse prévue en **juillet 2022** à l'Université d'Antananarivo, Madagascar. Directeur de thèse : Victor RAJAFINJATO, Coencadrement : 40%.

5. Mademoiselle Kamil Abdallah AMARILLIS, intitulé de la thèse : *Valorisation énergétique des déchets ménagers et assimilés : application à la gazéification pour la production d'électricité aux Comores*, soutenance de thèse prévue en **décembre 2022**. Thèse en cotutelle entre l'Université de la Réunion et l'Université d'Antananarivo, Madagscar. Directeurs de thèses : Jean Claude GATINA et Bienvenue RAHELIARILALAO, Codirection : 50%

12 Conclusion de mes activités d'enseignement et d'encadrement

D'une manière générale, mes activités d'enseignement et d'encadrement ont couvert différents domaines. En effet, j'ai enseigné différents aspects des sciences physiques dans des filières technologiques à vocation professionnelle (IUT de Saint-Pierre) et/ou générale (département de Science de l'Homme et de son Environnement). Il s'agit des matières en physique du bâtiment, en architecture, en thermique, en ambiance intérieure (éclairage, acoustique, etc.), en optimisation énergétique dans le bâtiment et en dimensionnement des systèmes de production d'énergie renouvelable à l'occurrence le gazéificateur. Cette diversité d'intervention s'est poursuivie par des enseignements de mathématiques appliquées en Licence voire de technique de rédaction d'articles scientifiques en Master ou de renforcement des capacités dans d'autres établissements d'enseignement publics internationaux.

Mon expérience, en enseignement, a débuté bien avant mon doctorat, dans un lycée professionnel, puis durant la préparation de ma thèse, à l'université de la Réunion. J'ai fortement souhaité développer mon expérience pédagogique en milieu universitaire non seulement pour conserver le contact avec les étudiants, mais également pour participer à la vie universitaire.

Si je résume mon parcours, la majeure partie de mes enseignements ont été réalisées dans des filières à l'université de la Réunion.

J'ai notamment effectué des Cours Magistraux, des Travaux Dirigés et Pratiques au département Génie Civil (GC) de l'IUT de Saint-Pierre ainsi qu'au département Sciences du Bâtiment et de l'Environnement (S.B.E) de l'UFR - S.H.E du Tampon (Université de La Réunion). J'ai également effectué des missions d'enseignement ponctuelles, d'encadrement et de renforcement des capacités (du corps enseignant) au sein de l'IUT des Comores dans le département Habitat et son Environnement et à la Faculté des Sciences dans le département Mathématique – Physique - Chimie et Informatique (MPCI) de cette même université. Je suis également intervenu en tant qu'expert en métrologie à l'Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo à Madagascar.

La Figure 12.1 illustre mes enseignements suivant le niveau, le type et la nature depuis maintenant plus de dix années.

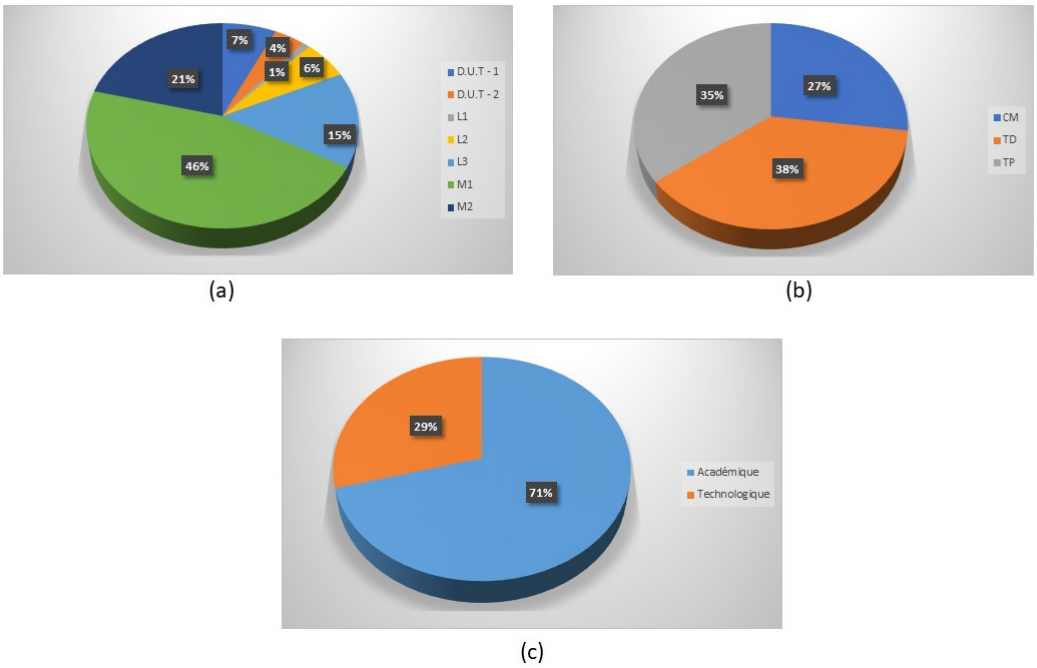

Fig. 12.1.: Répartition de mes enseignements de niveau Bac+1 à Bac+5 : par niveau (a), par type (b) et par nature (c)

Il est clair que mes interventions entre les CM, TD et TP sont équilibrées et que j'enseigne plus, en 2ème cycle, dans des filières beaucoup plus générales que professionnelles.

Concernant mes encadrements, je participe à la supervision de nombreux stages en recherche et dans le domaine professionnel en licence (3ème), en master, en ingénierie mais surtout en thèse de doctorat à l'IST d'Antananarivo, l'université des Comores et bien évidemment à l'université de la Réunion.

La Figure 12.2 repartit mes encadrements par niveau, par type et par degré d'implication. Le point marquant de ces graphes est qu'ils prouvent que j'encadre plus en stage de recherche qu'en stage professionnel. Cependant, ces encadrements concernent plus des stages de recherche que des travaux de thèse proprement dits. Je compte donc remédier à cela, dans les années à venir, en privilégiant davantage des supervisions de thèses de doctorat en codirection.

C'est pour cette raison que cinq futures thèses de doctorat dans mes champs d'applications, pour la plupart en bourses CIFRE et dont je dois à terme assurer la direction, seront très prochainement lancées. Il s'agit des sujets, que j'ai coinitiés, suivants :

1. Thèse doctorale avec M. Mohamed Nasroudine Mohamed RACHADI, intitulée : Développement d'un outil de pilotage multi-échelles dédié au pilotage d'énergie électrique intégrant les EnR : application en union des Comores. Un accord de principe pour un

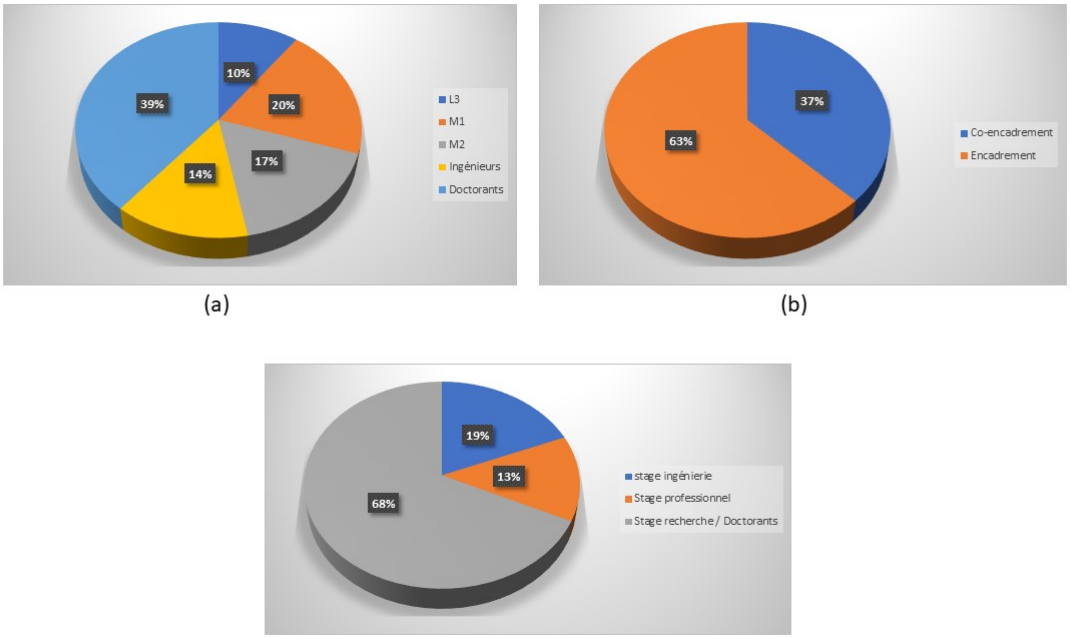

Fig. 12.2.: Répartition de mes encadrements de niveau Bac+3 à Doctorat : par niveau (a), par type (b) et par pourcentage d'encadrement (c)

accompagnement du candidat à une bourse CIFRE a été établi avec la société INNOVENT. En attente de la réponse de l'ANRT.

2. Thèse doctorale avec Mlle Mirantsoa Volana RANDRIAMANDIMBISOA, intitulée : Etude des biocapteurs météorologiques : modélisation, expérimentation et validation. Un accord de principe pour un accompagnement du candidat à une bourse CIFRE a été établi avec la société STRATAGEM974. L'inscription est en cours.

3. Thèse doctorale avec M. Blázquez Recio Alfonso José, intitulée : Valorisation des matériaux recyclés issus des déchets agricoles dans le secteur de la construction : le cas de l'île de la Réunion. Un accord de principe pour un accompagnement du candidat à une bourse CIFRE a été établi avec la société CANDA. L'inscription est en cours.

4. Thèse doctorale avec M. Ando Ny Aina Randriantsoa, intitulée : Energy harvesting from roadway through a thermo-piezoelectric : modelling, experimentation and validation of the hybrid system. Un accord de principe avec le groupement "Intercités du Grand Ouest" de la Réunion et du gouvernement Sud-Africain est en cours. La thèse sera en cotutelle entre l'université de Pretoria, l'université de la Réunion et l'IST d'Antananarivo.

5. Thèse doctorale avec M. Ny Aina Manitra Nany Razafindralambo, intitulée : Récupération, transformation et stockage de l'énergie à partir des plantes dans un contexte

insulaire : modélisation, expérimentation et validation. Recherche de financement CIFRE en cours. La thèse sera codirigée avec un enseignant-chercheur de l'IST d'Antananarivo.

Troisième partie

Responsabilités administratives et participation à des projets de recherche et de formation

Mes responsabilités ont été effectuées dans divers cadres au sein de l'université de la Réunion. J'ai été coresponsable pédagogique d'une filière d'enseignement durant trois années de suite, la gestion et le suivi du projet dénommé "Réussir en Licence" dans la filière Génie Civil de mon département de rattachement. J'ai aussi participé (soit en tant que chercheur soit en tant qu'ingénieur du laboratoire PIMENT et du département S.B.E) à deux projets FEDER et trois projets ERASMUS+ (en pédagogie et en recherche). Mon implication au sein de mon université de rattachement m'a amené à être élu dans trois conseils distincts : celui de la faculté S.H.E, celui du département S.B.E et enfin celui du laboratoire PIMENT. J'ai également répondu à des appels à projets sur des demandes de financement pour des missions de prospection dans le cadre de collaborations inter-universitaires (en recherche et en formation). Tout cela sera détaillé dans ce chapitre.

Table des matières de la troisième partie

13 Responsabilités administratives **147**

13.1 Coresponsable pédagogique 147

13.2 Projet "Réussir en Licence" 147

13.3 Élu dans trois conseils : UFR S.H.E, laboratoire PIMENT et département S.B.E 148

13.4 Autres responsabilités 148

14 Participation à des projets de recherche et de formation **151**

14.1 Les Appels à Projets en recherche 151

14.2 Trois demandes de financement pour des missions de collaboration . . . 152

14.3 Participation dans quatre Projets MIC (type ERASMUS+) de formation . . 153

14.3.1 Coporteur du MIC avec Wits University 153

14.3.2 Coporteur du MIC avec University of Pretoria 153

14.3.3 Participation au MIC avec l'université des Comores 153

14.3.4 Participation au MIC avec l'I.S.T d'Antananarivo 154

14.4 Participation à deux projets FEDER 154

14.4.1 Coporteur du projet SYNBIOZER 154

14.4.2 Participation au projet MCPi-Bât 155

14.5 Pilotage de trois brevets et de deux projets CIFRE 155

15 Conclusion sur mes responsabilités et mes participations à des projets **157**

13 Responsabilités administratives

J'ai été ATER durant les deux dernières années de préparation de ma thèse et ainsi qu'une année après la thèse. Ce titre m'a permis d'avoir des responsabilités au sein du département S.B.E. Après avoir été recruté en tant qu'ingénieur d'étude à l'université de la Réunion (en 2010), j'ai souhaité continuer mon implication administrative en participant aux sièges des différents instances qui le constituent. C'est ainsi que j'ai été élu dans trois conseils. Nous verrons en détail mon rôle dans ces responsabilités qui m'ont été confiées.

13.1 Coresponsable pédagogique

De 2007 à 2010, j'ai été coresponsable pédagogique du Master 1 professionnel Espace Construction Environnement de la Filière Génie Civil du département Science du Bâtiment et de l'Environnement (S.B.E). Mon rôle consistait à organiser, suivre et gérer les enseignements (planification des interventions des enseignants chercheurs, réunions de délibération des notes, etc.) ainsi que les stages des étudiants de la filière. Depuis 2020 je suis coresponsable pédagogique de la licence SE3B et du Master SE3B du département SBE de notre université et délocalisés à la FST de l'université des Comores.

13.2 Projet "Réussir en Licence"

Dans ce projet, qui a duré une année (de 2009 à 2010), mon rôle a été d'encadrer et orienter les étudiants en licence. Mes interventions ont été plus particulièrement focalisées dans la filière Génie Civil du département S.B.E de l'UFR - S.H.E. J'ai pour cela assuré le suivi et l'aide à l'insertion professionnelle des étudiants à travers ce projet financé par le ministère.

L'objectif principal a été :

1. de guider les étudiants en échec universitaire à des filières plus appropriées selon leur projet professionnel ;
2. d'orienter et de suivre les étudiants à la recherche de stage ou d'emploi futur.

13.3 Élu dans trois conseils : UFR S.H.E, laboratoire PIMENT et département S.B.E

Après avoir été lauréat d'un concours sur le poste d'ingénieur à l'université de La Réunion (en 2010) et après avoir acquis de l'expérience sur le poste que j'ai occupé durant ces six dernière années, j'ai éprouvé le besoin de m'impliquer davantage dans l'administration de l'UFR S.H.E. J'ai été élu dans le collège des BIATSS des trois instances suivantes :

- Membre élu du collège des personnels BIATSS dans le conseil du laboratoire PIMENT (Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie et l'environnemENT) depuis 2016 ;
- Membre élu du collège des personnels BIATSS dans le conseil du département Science de l'Homme et de l'Environnement (S.B.E) - UR (depuis 2017) ;
- Membre élu du collège des personnels BIATSS dans le conseil de l'UFR Science de l'Homme et de l'environnement (S.H.E) – UR (depuis 2018).

13.4 Autres responsabilités

Le titre d'ingénieur titulaire de l'université de la Réunion m'a permis d'exercer d'autres fonctions telles qu'être :

- Référent en prévention des risques au sein du laboratoire PIMENT ;
- Membre de plusieurs jurys de recrutements du personnel de la fonction publiques (B.I.A.T.S.S) ;
- Expert national en expérimentation et instrumentation scientifique ;
- Référent de deux projets ERASMUS+ de l'université de la Réunion : Mobilité Internationale de Crédits (MIC) avec l'université de Pretoria et l'université Wits (Johanesbourg) en Afrique du Sud ;
- Responsable des espaces techniques du département SBE et du laboratoire PIMENT : j'assure la gestion (financière et technique) des appareils et outillages du service technique de ces deux entités et manage trois techniciens ;
- J'effectue des missions nationales (Paris, Albi, Toulouse, Strasbourg, Haute-savoie, Nancy) et internationales (Afrique du Sud, Canada, Émirats Arabes Unis, Comores, Maurice, Madagascar, Angleterre) de coopérations dans le but de rechercher des partenariats entre notre université et d'autres établissements ;
- Référent technique au niveau de l'université de la Réunion du projet FESTII (voir F14) ;

- J'accompagne des institutions étrangères à structurer des filières de formation (en DUT, en Licence et en Master), de recherche (école doctorale et laboratoires de recherche) et de service technique (Ateliers techniques, formation du personnel technique et rédaction de documents techniques).

14

Participation à des projets de recherche et de formation

Je me suis impliqué dans des appels à projets qui m'ont permis d'enclencher des collaborations interuniversitaires entre notre laboratoire de recherche et d'autres laboratoires pour la plupart de la zone océan Indien (missions de prospection ainsi qu'une demande de financement pour un professeur invité). J'ai aussi répondu à des appels à projets incitatif pour financer des dispositifs expérimentaux du laboratoire. Je contribue énormément aux montages des projets de type ERASMUS+ de notre établissement (échanges inter-universitaires dans le cadre de la recherche et de la formation), mais également dans des projets européens de type FEDER. Dans ce qui va suivre, nous verrons en détail ces projets et mon degré d'implication.

14.1 Les Appels à Projets en recherche

J'ai participé à sept projets de recherche (voir les références [F01], [F02], [F03], [F04], F05, [F06] et [F07] de l'annexe G pour plus de détail). Dans ce qui suit, nous ne présenterons que le projet [F04] qui correspond à l'achat d'un gazogène dédié à la recherche.

Depuis 2017, je fais partie d'un axe de recherche du laboratoire PIMENT qui travaille sur la thématique de la production d'électricité à partir des déchets par le procédé de pyrogazéïfication. Nous nous intéressons particulièrement à l'optimisation d'un gazogène à lit fixe dédié aux petites zones rurales non connectées au réseau. Dans ce cadre d'étude, j'ai coporté un projet de demande de financement pour l'achat d'un prototype de gazogène à lit fixe permettant de produire 15 kW d'électricité par heure à partir d'un débit de biomasse (provenant des déchets verts) de 6 $kg.h^{-1}$. Le projet a été financé par l'UFR S.H.E (appel à projet interne), à une hauteur globale de 30 k€ (voir [F04] de l'annexe G).

14.2 Trois demandes de financement pour des missions de collaboration

La Direction des relations internationales (ou DRI) de l'université de la Réunion accompagne financièrement des projets de prospection interuniversitaires pour d'éventuelles collaborations en recherche et en formation. C'est dans ce cadre précis que j'ai pu porter deux projets de prospection (un en Afrique du Sud et un autre aux Émirats Arabes Unis) dans l'optique de me rendre dans des établissements publics pour entamer des démarches de collaboration sur des thématiques de recherche communes.

Ainsi, j'ai bénéficié d'une première mission financée par la DRI d'un montant de 1466 € ([F07] de l'annexe G) le 21 juin 2018 sous la reférence AAP2-PROJ7 pour une mission en Afrique du Sud entre le 30/10/18 et 06/11/18 dans le cadre d'une visite à Wits University et à University of Pretoria. Cela a permis le montage de deux MIC (ERASMUS+) sur des échanges et des partenariats en recherche et en formation entre notre université et celles citées ci-dessus.

Une deuxième mission, financée également par cette même structure, le 26 juin 2019 sous la reférence AAP2-PROJ20, à hauteur de 1999 € ([F08] de l'annexe G), m'a permit de me rendre aux Émirats Arabes Unis entre le 16 et le 23 novembre 2019 pour une prise de contact et future collaboration en recherche et pédagogie entre notre université et l'université de Sharjah.

la troisième demande de financement été destiné à faire venir, au sein de notre université, un professeur de l'université de Pretoria pour une mission à la fois de formation et de future collaboration en recherche. En effet, le pôle recherche de l'université de la Réunion a lancé le 12 février 2019 un AAC (Appel à Candidature dématérialisé) dédié aux experts et aux professeurs invités. Le professeur Wynand JvdM STYEN de l'université de Pretoria a ainsi pu bénéficier d'une visite au sein du département S.B.E du 23/09/19 au 29/09/19 (voir [F10] de l'annexe G). Cette mission avait également pour but de développer des collaborations sur des thématiques transversales de recherche communes en lien avec la récupération de l'énergie des routes, ponts et chaussée.

14.3 Participation dans quatre Projets MIC (type ERASMUS+) de formation

14.3.1 Coporteur du MIC avec Wits University

Je coporte un projet ERASMUS+ pour des échanges d'étudiants et de personnel entre l'université de la Réunion et celle de Witwatersand (en Afrique du Sud) dans le cadre des Mobilités Internationales de Crédits numéro : 2019-1-FR01-KA107-061755. Le projet a démarré en octobre 2019 et finira en octobre 2022 (voir [F09] de l'annexe G). Je coordonne non seulement les mobilités entrantes et sortantes du personnel, des deux institutions, dans le cadre d'une formation (technique, administrative ou de recherche) et/ou d'enseignement, mais également celle des étudiants de ces deux universités, dans le cadre de mobilités de stage et/ou formation (étude). J'organise les missions, les stages et j'assure le suivi des actions à mener pour évaluer les échanges entre les deux établissement. Le montant global du projet s'élève à 79 9995 €. Les thématiques de recherche développées entre les deux institutions sont plus orientées vers l'énergétique.

14.3.2 Coporteur du MIC avec University of Pretoria

Comme pour le MIC avec Wits University, notre département S.B.E ainsi que certains enseignants chercheurs du laboratoire PIMENT ont développé des collaborations avec l'école d'ingénieur en Génie Civil de l'université de Prétoria en 2019. Cela a donné lieu à la mise en place d'un projet de partenariat et d'échanges entre les deux institutions dont je suis le coporteur. Ce projet de Mobilité Internationale de Crédits numéro : 2020-1-FR01-KA107-079708 (au titre de K 107) d'environ 314 802 € a été retenu par l'union européenne et démarre cette année 2020 (voir [F11] de l'annexe G). Mon rôle est le même que celui énoncé dans le MIC de l'université de Wits décrit précédemment.

14.3.3 Participation au MIC avec l'université des Comores

Un projet MIC, piloté par le département S.B.E (université de la Réunion), a été déposé auprès de l'ERASMUS+ et a été retenu parmi les projets lauréats de l'année 2019. Ce projet vise à renforcer les compétences et capacités de l'université des Comores. Je participe en tant qu'enseignant (formation pédagogique) et chercheur (encadrement d'un doctorant inscrit à l'université d'Antananarivo et ayant comme université de rattachement celle des Comores). Le projet est estimé à 159 695 € sur trois années (voir [F12] de l'annexe G pour plus de détail sur le projet et mes interventions).

14.3.4 Participation au MIC avec l'I.S.T d'Antananarivo

Depuis maintenant plus de cinq années, un MIC (renouvelé deux fois) entre le département S.B.E et l'I.S.T d'Antananarivo a été monté. J'ai pu bénéficier de ce projet pour partir enseigner les techniques de base en expérimentation scientifique et protocole de fiabilité des données dans la recherche. Ce projet m'a également permis de participer à des encadrements de thèses de doctorat (plus précisément deux thèses de doctorat en cours et que je coencadre) dans le cadre du renforcement des capacités de l'I.S.T. Le financement du projet ainsi que de son renouvellement toutes les trois années est d'environ 169 580 €, en moyenne (voir [F13] de l'annexe G).

14.4 Participation à deux projets FEDER

Je participe à deux projets FEDER (l'un en tant qu'ingénieur d'étude en experimentation et l'autre en tant que chercheur du laboratoire PIMENT). Nous verrons dans ce qui suit mon rôle dans chacun de ces projets.

14.4.1 Coporteur du projet SYNBIOZER

Le projet SYNBIOZER entre dans le cadre des recherches menées au sein du laboratoire PIMENT dans le domaine de la pyrogazéïfication à échelle réelle. L'équipe constituée autour de cette thématique s'intéresse plus particulièrement à l'optimisation de forme d'un gazogène à lit fixe cocourant dédié à la production d'électricité à partir des ordures municipales assimilées. Toute la chaîne de production sera ainsi étudiée à travers un site pilote afin d'augmenter le rendement énergétique du dispositif. Le projet soumis à l'Union euroéenne, à travers les Appels à Manifestation d'Intérêt (A.M.I) des projets FEDER, a obtenu l'avis favorable et a démarré cette année 2020. Le montant global du projet s'élève à environ 677 033 € sur deux années (voir [F06] de l'annexe G). J'ai participé au montage du projet tels que la rédaction du dossier de demande de financement et plus particulièrement de la partie technique et financière (en tant qu'ingénieur d'étude du laboratoire) de ce dernier. J'ai aussi participé à la réflexion et à la démarche scientifique (en tant que chercheur et membre de l'équipe travaillant dans cette thématique) qui devra être menée pour atteindre les objectifs fixés (partie recherche), en particulier sur la mise en place des outils numériques qui devront faire l'objet d'une validation expérimentale (en d'autres termes d'une comparaison modèle et mesures) dans le projet. J'interviendrai plus tard sur le mise en oeuvre du projet en appui aux ingénieurs et techniciens qui seront recrutés.

14.4.2 Participation au projet MCPi-Bât

Le laboratoire PIMENT pilote un projet FEDER, d'une durée de trois années, d'environ 739 141 €, dénommé MCPi-Bât (voir [F05] de l'annexe G). Ce projet a pour objectif d'étudier les matériaux à changement de phase intégrés dans l'enveloppe d'un bâtiment en zone tropicale et humide. J'ai participé, en amont, à l'élaboration du dossier technique (partie expérimentation ainsi que le coût associé aux dispositifs de mesure) en tant qu'ingénieur du laboratoire. Depuis son lancement (en 2019), j'accompagne les deux IGR locaux du projet dans la partie métrologique et apporte mon expertise aux porteurs du projet sur les techniques de mesure non destructives des systèmes étudiés.

14.5 Pilotage de trois brevets et de deux projets CIFRE

J'ai supervisé le dépôt de deux brevets (voir [Brevet1] et [Brevet2]) et pilote actuellement un futur brevet qui devrait être déposé d'ici le mois d'octobre 2020. En plus de ces responsabilités, je coordonne deux futurs projets de bourses doctorales CIFRE en collaboration avec deux entreprises qui sont "Innovent" et "Stratagèm974".

15 Conclusion sur mes responsabilités et mes participations à des projets

Durant ces dix dernières années j'ai participé au développement du rayonnement de l'université de la Réunion dans la zone océan Indien. J'ai notamment contribué à inscrire l'université de la Réunion comme partenaire européen de l'Afrique du Sud. J'ai coporté des projets de mobilité interuniversitaire permettant un avancement dans les actions de recherche, mais aussi l'émergence de nouveaux projets de recherche communs . Des codirections de stages en laboratoire ou de cotutelles de thèses ont ainsi pu être réalisés. J'ai également participé au renforcement des capacités de certaines institutions de l'océan Indien à travers des projets européens. Mon parcours m'a également donné l'opportunité d'occuper des postes à responsabilité (élu dans des conseils de l'université, coresponsable pédagogique d'une filière, coporteur de projets de recherche et de formation, missionnaire, expert national, etc.).

Je participe aux développements de brevets au sein du laboratoire PIMENT et travail en étroite collaboration avec des entreprises sur des projets CIFRE en recherche appliquée à l'innovation technologique.

Quatrième partie

Conclusion générale et perspectives

Table des matières sur la quatrième partie

16 Conclusion générale et perspectives sur mes recherches **161**

17 Conclusion générale et perspectives sur mes enseignements et encadrements **165**

18 Perspectives en recherche et en formation **167**

16 Conclusion générale et perspectives sur mes recherches

L'énergie pour tous, des habitations décentes et moins polluantes ainsi que la prédiction de l'évolution du climat et des microclimats constituent des défis environnementaux, économiques et technologiques majeurs. La question de la conception d'un bâtiment produisant sa propre énergie dans le respect de l'environnement reste une problématique qui appelle des réponses adaptées au contexte de l'océan Indien et ses spécificités climatiques. Les enjeux sont de taille et nécessitent une approche systémique tant la transversalité et la pluridisciplinarité des problèmes l'imposent. Dans notre manuscrit, nous avons soulevé le problème rencontré par les chercheurs des pays du Sud, lié à la recherche expérimentale dans le domaine de l'énergie, de la physique du bâtiment et de l'environnement. Nous avons ensuite proposé une approche de recherche adaptée au contexte des laboratoires de recherche des pays du Sud et beaucoup plus orientée vers l'autoconception des dispositifs expérimentaux low-cost et fiables dédiés à cette recherche expérimentale. Des exemples de réalisations, accompagnés pour certains par des entreprises nationales, en partenariat avec certains de ces pays du Sud, ont illustré nos propos. Des publications scientifiques ainsi que des brevets ont été réalisés, justifiant ainsi de la pertinence et de l'originalité de nos travaux. S'agissant des études expérimentales hypercomplexes, nous nous sommes, dans un premier temps, orientés vers le développement d'outils numériques capables de simuler les phénomènes intégrés à des systèmes avec des algorithmes basés sur la même logique de base de connaissances appliquée auparavant. Les logiciels développés au sein de notre laboratoire prouvent l'efficacité de notre démarche.

Concernant l'axe sur la recherche expérimentale, ce rapport a permis d'aborder trois conceptions importantes dans les domaines de l'énergie, la physique du bâtiment et l'environnement. La première est cellle de la mise en place d'un dispositif expérimental portatif simple d'utilisation et de conception, permettant de quantifier la teneur en méthane et en hydrogène d'un gaz combustible et donc capable de remplacer un chromatographe assez coûteux. La deuxième conception concerne la réalisation d'un prototype expérimental capable de caractériser certaines propriétés thermo-optico-physiques d'un matériau de construction innovant et complexe (qui n'est ni opaque, ni transparent par exemple), avec un coût financier beaucoup plus abordable par rapport aux appareils existants. et enfin, la troisième conception est en lien avec la technique de mesure permettant de transformer une plante en un ou plusieurs capteurs de mesures météorologiques,

dans le but de réduire le coût financier des capteurs existants, de suivre l'évolution du climat ou du confort humain à l'intérieur d'un bâtiment. Il permet également de s'assurer du respect de l'environnement en utilisant des biocapteurs qui polluent moins. Dans l'avenir, nous envisageons de continuer à développer d'autres prototypes innovants de mesure, répondant aux contraintes financières des laboratoires de recherche des pays du Sud dans le respect de l'art et avec la meilleure précision possible. Grâce à ces systèmes fiables et ingénieux, les pays du Sud pourront lever un verrou non négligeable de leur politique d'orientation en recherche, à savoir le coût des expérimentations qui doivent être menées dans certaines études. De même qu'un partenariat avec ces pays permettra de mener des recherches de pointe sur l'amélioration de ces dispositifs expérimentaux dans le domaine de la métrologie, plus particulièrement en conception de capteurs ou biocapteurs, destinés surtout aux mesures en énergétique, en physique du bâtiment et environnement. Les recherches seront non seulement orientées vers des propositions de protocoles de mesure plus adaptés, mais également vers de nouveaux modèles d'observation et de couplage des phénomènes complexes, associés soit à l'ensemble de l'appareil de mesure, soit au nouveau capteur qui sera conçu toujours dans une approche systémique des phénomènes physiques à mesurer. Le champ d'application de notre approche étant très vaste, nous envisageons dans le futur d'élargir notre méthode et notre savoir-faire en conception et métrologie à d'autres disciplines scientifiques (biologie, chimie, géologie, etc.), en fonction des besoins en expérimentation qui seront soulevés par les différents laboratoires de recherche. Des nombreuses paramètres physiques utilisées dans la littérature scientifique restent encore difficilement mesurables. Ainsi, travaillant dans la conception métrologique que nous définissons de "métrologie en économie circulaire" ou encore de "métrologie low-cost de grande précision", nous permettra peut-être d'apporter notre modeste contribution au développement de la recherche expérimentale de manière générale, en proposant des solutions sur des techniques de mesure et des modèles associés à des mesure jusqu'alors inexploités.

Pour ce qui est des outils numériques, nos travaux ont conduit à la création ou amélioration d'outils d'aide à la décision dédiés aux trois domaines qui nous intéressent. Nous avons implémenté deux nouveaux modèles d'éclairement naturel (intérieur et extérieur) en 3D dans un code de calcul en langage C, développé au sein de notre laboratoire et capable de simuler les phénomènes de couplage thermo-aéraulique en physique du bâtiment, appelé CODYRUN. Les travaux se sont poursuivis par d'autres études en lien avec les puits de lumière canadiens dans les habitations. Actuellement, nous envisageons de développer un modèle empirique du gisement solaire lumineux extérieur spécifique à l'île de la Réunion. Les bases de données de connaissances sur cette variable optique dont nous disposons actuellement au niveau local sont insuffisantes pour mener à bien une telle étude. Nous serons en mesure d'exploiter cette base d'ici 2021.

Nous avons également proposé un outil permettant de dimensionner et d'optimiser un système gazogène dédié à la production d'électricité à partir de déchets. De par le nombre

élevé d'équations (ç.à.d. environ 79 équations de natures très variées et liées entres elles) qu'il a fallu résoudre simultanément, nous avons choisi d'utiliser un solveur d'équation, très connu en programmation et mieux adapté au contexte de notre étude, dénommé EES. L'outil proposé, appelé SIZER, est en mesure de fournir en régime permanent et en 1D des informations sur les caractéristiques de la biomasse telles que son pouvoir calorifique, la durée de la combustion, la quantité de syngaz pouvant être produit à partir du débit de la biomasse. Il est aussi possible de connaître, à partir de SIZER, toutes les informations relatives au syngaz (débit, quantité, composition, température, par exemple) et aux cendres (quantité et durée, par exemple) produites. Pour l'instant, les résultats obtenus ne traitent que d'un seul et unique gaz de synthèse (carburant). Nous souhaitons enrichir les performances de l'outil en intégrant des modèles complémentaires qui tiendront compte de mélanges de carburants différents. Le but sera de simuler l'optimisation de ce mélange.

Le troisième outil développé par le laboratoire, que nous avons présenté dans ce manuscrit, est SMARTEN. Ce logiciel, codé sous Matlab, est en mesure de simuler le pilotage d'un réseau mixte d'électricité suivant plusieurs échelles (ç.à.d. au niveau d'un bâtiment, d'un espace bâti, d'une ville ou d'un territoire à différents échelles) et quel que soit le pas de temps. L'originalité de ce code repose sur les nouveaux algorithmes systémiques proposés par l'équipe du laboratoire PIMENT en collaboration avec d'autres chercheurs de l'océan Indien. Une deuxième particularité de SMARTEN est sa capacité à reproduire la cartographie en couleur de ce pilotage dans un plan 2D de l'environnement d'étude. Ainsi, les utilisateurs ont une vision plus globale des bâtiments nécessitant plus d'énergie sur une carte géographique. Cela peut, par exemple, aider à choisir l'emplacement d'une future centrale éolienne vis-à-vis de la zone d'étude. L'objectif principal de cet outil de recherche est de développer, adapter et mettre en œuvre un prototype électronique qui intègre le programme SMARTEN dans le but de piloter automatiquement un système de réseau électrique mixte interconnecté. Des études sont en cours afin de proposer ce prototype électronique. Outre cet aspect, l'amélioration de l'outil se poursuivra par la mise en place de nouveaux modèles de profils de consommation électrique spécifique aux zones tropicales et humides et plus particulièrement aux états insulaires. Les résultats issus des modèles de prédiction seront exploités pour la conception de systèmes de gestion intelligente de l'énergie dont l'objectif est de contribuer à la sûreté des réseaux électriques (connectés ou non connectés). Tous ces outils, développés au sein du laboratoire, ont un objectif unique qui est la nécessité de produire des travaux visant non seulement à comprendre les interactions des phénomènes multiéchelles et multidisciplinaires qui se produisent entre un espace bâti, un système de production d'énergie et leur environnement direct, mais également à construire une plateforme numérique unique qui constituerait un véritable outil d'aide à la prise de décision dès lors que l'on cherche à identifier les solutions de production d'énergie et de conception d'espaces bâtis présentant des contraintes tolérables sur le plan environnemental, économique, social et technique.

Ces recherches, pour la plupart finalisées, étaient nécessaires dans le contexte actuel de transition énergétique et écologique, car elles permettent de situer les enjeux et le rôle que pourrait avoir la zone océan Indien en tant qu'acteur du développement économique mondial. Mes perspectives de recherche envisagées pour les prochaines années s'inscrivent dans la continuité des travaux que j'ai menés dans les deux axes de ma synthèse, en veillant à y associer des collaborations extérieures à notre université actuelles ainsi que des nouvelles.

17 Conclusion générale et perspectives sur mes enseignements et encadrements

L'université de la Réunion encourage fortement la politique de formation et d'accompagnement de ses étudiants orientée vers l'internationalisation. Elle met également l'accent sur la nécessité de collaborer avec les pays limitrophes de la zone océan Indien allant jusqu'à décentraliser certaines de ses filières. Ainsi, le département Science du Bâtiment et de l'Environnement (S.B.E), auquel je suis rattaché, a délocalisé plusieurs filières aux Comores (Licence SE3B et bientôt le Master SE3B à la FST de l'université des Comores), à Maurice (Master GC à l'université des Mascareignes) et à Madagascar (Master EBENE à l'IST d'Antananarivo). En plus de mes vacations ponctuelles à l'université de la Réunion, je projette de beaucoup m'investir dans nos filières délocalisées sur des unités d'enseignement en lien avec l'énergétique, le génie civil et l'environnement. Je suis d'ailleurs coresponsable pédagogique de la licence (3ème année) SE3B et du Master SE3B qui s'ouvrira à la rentrée 2020-2021 aux Comores.

J'apporte également mon expertise en métrologie en proposant régulièrement des formations aux corps enseignant et technique de l'IST d'Antananarivo. Les mêmes renforcements des capacités seront aussi proposés à l'université des Mascareignes. Dans un futur proche, je compte réorienter mes enseignements plutôt vers l'instrumentation et l'expérimentation scientifique dans les domaines de l'énergie, la physique du bâtiment et l'environnement. Le public ciblé sera de niveau master et/ou ingénieur voire un niveau doctorat. Concernant mes encadrements, je participe à la supervision de nombreux stages en recherche et dans le domaine professionnel en licence (3ème), en master, en ingénierie mais surtout en thèse de doctorat à l'IST d'Antananarivo, l'université des Comores et bien évidemment à l'université de la Réunion.

18 Perspectives en recherche et en formation

Les challenges fixés par le laboratoire PIMENT, le département S.B.E et l'UFR SHE, auquel je suis rattaché, pour les prochaines années, restent considérables tant les besoins et objectifs à atteindre en formation et en recherche, au niveau de l'université de la Réunion, sont immenses. Les actions que j'envisage de poursuivre dans les années à venir afin d'apporter ma contribution au sein de mon établissement de rattachement sont les suivantes :

1. **Au niveau de l'université de la Réunion** : continuer à accompagner naturellement notre institution et participer activement à sa politique d'ouverture à l'international, aussi bien en recherche que dans la formation et, en particulier, dans la zone océan Indien. Je souhaite faire rayonner notre institution par des projets de collaboration, voire de renforcement des capacités, avec les pays du Sud, voisins de l'île de la Réunion. Pour cela, je continuerai à porter des projets nationaux et internationaux, pour le rayonnement de l'université, en formation et/ou en recherche. S'agissant de la recherche, j'ambitionne de créer un journal, au sein de l'université d'ici fin 2022, en science dure, orienté vers la métrologie et expérimentation low-cost dédiée à la recherche scientifique. A ce jour, le partenaire Elsevier a donné son accord de principe, le réseau international des chercheurs dans le domaine est créé et les sponsors du projet (UE, COI, Région Réunion, Département Réunion, etc.) sont identifiés pour des négociations futures sur les modalités de financement possibles.
2. **Au niveau de l'UFR SHE** : Je continuerai à siéger au le conseil de l'UFR (fin du mandat prévu en 2023) et à apporter mon soutien en participant au débat sur la politique et stratégie de cette jeune faculté, notamment dans les orientations futures des Nouvelles Offres de Formation ou encore dans l'accompagnement des laboratoires de recherche associés à l'UFR.
3. **Au niveau du département SBE** : Je m'engage à continuer d'oeuvrer dans l'organisation des journées portes ouvertes du département. Je compte continuer à siéger au sein du conseil de département. Le point supplémentaire, et pas des moindres, est que je compte m'investir dans mes nouvelles missions, attribuées cette année, de coresponsable pédagogique de la licence SE3B, ouverte cette année, et futur Master SE3B, tous deux délocalisés à l'université des Comores durant au moins ces deux prochaines années. Je coporte également deux projets ERASMUS+ avec

l'Afrique du Sud (un avec Wits University et un autre avec l'université de Pretoria), qui ont démarré cette année. Ces deux projets d'échanges et collaboration à la fois en recherche et en formation ont été établis en partenariat avec mon département de rattachement. C'est donc logiquement que j'assurerai la responsabilité administrative et jouerai le rôle de point focal dans ces deux projets durant les trois années à venir.

4. **Au niveau du laboratoire PIMENT** : Je continuerai d'oeuvrer dans l'organisation des journées portes ouvertes du laboratoire. Je compte utiliser mon réseau privilégié d'acteurs économiques localisé sur l'île de la Réunion pour monter des projets sur des thématiques de recherche appliquée. Ces partenariats se traduiront inévitablement par des financements de bourses CIFRE, de brevets et de projets impactant le développement économique dans les domaines de l'énergie, de la physique du bâtiment et l'environnement au niveau régional voire, par moment, national et peut-être même international. Toujours dans la continuité de mes recherches appliquées que je définis de "métrologie circulaire" ou de "métrologie low cost de de très grande précision", je compte tirer profit de nos projets ERASMUS+ avec l'Afrique du Sud, les Comores, Madagascar et Maurice pour développer un réseau de chercheurs avec qui nous initierons des thématiques de recherche nouvelles et communes respectant les spécialités de chacun. C'est par exemple le cas actuel du partenariat que j'ai initié entre notre laboratoire, l'université de Pretoria et l'IST d'Antananarivo sur la thématique de la récupération d'énergie des routes.

5. **Au niveau national** : j'ambitionne de coporter un futur projet ANR, en partenariat avec les acteurs économiques de l'île et les différents laboratoires nationaux et internationaux, déjà identifiés, sur la thématique de l'électrophysiologie des plantes (biocapteur, biogénérateur électrique et biostockage) que j'envisage d'initier au sein de mon laboratoire de rattachement.

6. **Au niveau internationnal** : j'ai eu l'opportunité de cerner, à travers de nombreuses et diverses missions, les attentes dans la stratégie et politique de recherche des pays de la zone océan Indien durant ces dix dernières années. Cela m'a amené à revoir mes pistes de recherche et à les adapter ou réorienter vers les domaines et spécialités que j'ai présentés tout au long de ce rapport. Je compte accompagner l'université des Comores, dans un projet INTERREG très ambitieux piloté par l'université de la Réunion, qui permettra à cette jeune université de restructurer l'ensemble des laboratoires de recherche existant localement ainsi que l'ouverture d'une future école doctorale. L'université de la Réunion sera alors acteur direct du projet et proposera son expertise et son savoir-faire à travers le renforcement des capacités des corps enseignant, technique et administratif de l'université des Comores. Sur le plan technique, je participe déjà au projet FESTI en tant qu'expert en expérimentation, d'environ 900 k€ sur trois années, qui a débuté cette année 2020. Ce projet regroupe trois pays du Nord (le Portugal,l'Espagne et la France)

et trois pays du Sud (Madagascar, Maurice et les Comores). Les partenaires du projet sont l'université de la Réunion (France), l'université de la Laguna (Espagne), l'université des Açores (Portugal), l'IST d'Antananarivo (Madagascar), l'IST d'Antsiranana (Madagascar), l'université des Mascareignes (Maurice), l'université de Maurice (Maurice) et l'université des Comores (les Comores).

ANNEXES

A Annexes A : Fiche Synthétique (mini-CV) **173**

B Production scientifique et participation à des projets **175**

B.1 Ouvrages et chapitres d'ouvrages (05) 176

B.2 Revues spécialisées avec comité de lecture (17) 177

B.3 Congrès et conférences avec actes publiés (21) 178

B.4 Séminaires sans actes publiés (12) 179

B.5 Rapports et mémoires (15) 180

B.6 Participation à des projets (15) 181

Annexes A : Fiche Synthétique (mini-CV)

A

DAMIEN ALI HAMADA FAKRA, DOCTEUR/INGÉNIEUR

119 rue Paul Verlaine Apt B, 97430, Le Tampon (REUNION) | +262 (692) 89 11 37 | fakra@univ-reunion.fr | https://www.researchgate.net/profile/Damien_Fakra

STATUT ACTUEL (DEPUIS 2011)

Ingénieur d'étude titulaire à l'université de La Réunion. Je suis responsable de la mise en place et du bon fonctionnement des dispositifs expérimentaux sur des nombreux sites du laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie et l'environnemeNT (PIMENT) et département Science du Bâtiment et de l'environnement (S.B.E) de l'UFR Science de l'Homme et de l'Environnement (S.H.E). J'encadre trois techniciens et participe à des projets de recherche (ANR, FEDER, etc.) et de formation (ERASMUS).

DIPLÔMES (DEPUIS 1996)

- **Doctorat en 2009:** Université de La Réunion (FRANCE), option : Physique du Bâtiment ($3^{ime} cycle$).
- **Diplôme d'Etude Approfondie (D.E.A) en 2004:** Université de La Réunion (FRANCE), option : Energie-Mécanique.
- **Maitrise ès Science et Technique (M.S.T Ingénieur) en 2001 :** Université Moulay Ismael (MAROC), option : Energétique-Mécanique.
- **Diplôme d'Etude Universitaire Géneral (D.E.U.G) en 1999 :** Université Moulay Ismael (MAROC), option : Mathématique-Physique.
- **Baccalauréat en 1996 :** Ecole privée Groupe Scolaire Foundi Abdoulhamid (G.S.F.A), Série : D.

LES ACTIVITÉS DE MES RECHERCHES (DEPUIS 2004)

Mes études de modélisations, de simulations, d'expérimentations et de validations gravitent autour des domaines d'applications en lien avec les énergies renouvelables, la métrologie, l'étude du confort humain et les espaces ou systèmes bâtis. En résumé, je dispose à mon actif de :

Ouvrages et chapitres d'ouvrages (nombre : 05) : 2 ouvrages et 3 chapitres d'ouvrages publiés;
Publications revues spécialisées de rang A avec comité de lecture (nombre : 17) : 09 articles publiés et 08 en cours d'évaluations;
Congrès et conférences avec actes publiés (nombre : 21) : 02 nationaux et 17 internationaux publiés + 01 accepté (en cours);
Séminaires sans actes publiés (nombre : 12) : 04 réalisés au niveau national et 08 à l'étranger;
Rapports de recherche et mémoires (nombre : 15) : 12 rapports de recherche et 03 mémoires de fin d'études;
Participations à des projets (nombre : 14) : 06 projets de recherche, 06 projets de formation et 02 projet de collaboration;
Reviewer d'articles dans des journaux Internationnaux depuis 2009 (nombre : 07) : Renewable Energy Journal (Elsevier) , Building Engineering Journal (Elsevier) , Energy Conversion and Management Journal (Elsevier) , Measurments Journal (Elsevier), Data In Biref Journal (Elsevier), Sensors Internationnal Journal (Elsevier) et Journal of the Institution of Engineers (Elsevier).

LES ACTIVITÉS DE MES ENSEIGNEMENTS (DEPUIS 2006)

- De 2006 à 2007 - Chargé d'Enseignement Vacataire (C.E.V) à l'université de La Réunion;
- Depuis 2009 - Missionnaire à l'université Des Comores (renforcement des capacités au niveau du corps enseignant);
- De 2006 à 2010 - Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (A.T.E.R);
- Depuis 2011 - Chargé d'Enseignement Vacataire (C.E.V) à l'université de La Réunion;
- Depuis 2019 - Missionnaire à l'Institut Scientifique et Technologique d'Antananarivo (renforcement des capacités au niveau du corps enseignant);

BREVETS

- Brevet national numéro FR2005688 déposé le 29/05/2020;
- Brevet national numéro FR2007873 déposé le 27/07/2020.

DISTINCTIONS

- Lauréat d'une bourse d'étude de l'Agence Marocaine de Coopération Internationale (A.M.C.I) en 1996 (niveau : premier cycle);
- Lauréat d'une bourse d'étude de l'Agence Universitaire de la Francophonie (A.U.F) en 2003 (niveau : deuxième cycle);
- Lauréat d'une bourse d'étude Régionale de la Région Réunion en 2004 (niveau : troisième cycle).

ACTIVITÉS ADMINISTATIVES (DEPUIS 2007)

- Elu au conseil de l'U.F.R - S.H.E (depuis 2018) ;
- Elu au conseil du département Science du Bâtiment et de l'Environnement de l'UFR S.H.E (depuis 2017) ;
- Elu au conseil de laboratoire PIMENT (de 2010 à 2020) ;
- Co-responsable pédagogique d'un Master 1 GC (de 2007 à 2010) et d'une Licence 3 SE3B (depuis 2020).

AUTRES

- Qualifié aux fonctions de MCF en 60 (en 2011) et 62 (en 2010);
- Expert National en expérimentation et instrumentation scientifique auprès de la fonction publique depuis 2017;
- Membre de plusieurs jurys de recrutements du personnel de la fonction publiques (B.I.A.T.S.S);
- Membre de deux jurys de thèse soutenues en 2018 et 2019;
- Co-encadrements de thèses : 2 soutenues (coencadrement), 3 thèses en cours (deux coencadrements et une codirection) et 3 projets de thèses en cours (en codirection).
- Autres encadrements de stage recherche (depuis 2008) : 4 en licence / 17 en Master / 10 en cycle d'ingénieur.

B

Production scientifique et participation à des projets

B.1 Ouvrages et chapitres d'ouvrages (05)

Ouvrages et chapitres d'ouvrages : **03**

[A01] D. Bigot, F. Miranville, **A. H. Fakra,** I. Ingar, S. Guichard and H. Boyer *Thermal performance of photovoltaic systems integrated in building.* In: Solar Collectors and Panels, Theory and Applications, 444 p., October 2010. Publisher: SCIYO ISBN: 978-953-307-142-8.

[A02] H. Boyer, F. Miranville, D. Bigot, S. Guichard, I. Ingar, A. P. Jean, **A. H. Fakra**, D. Calogine, T. Soubdhan, *Heat transfer in buildings: application to air solar heating and trombe wall design*, InTech: Evaporation Condensation and Heat Transfer (chapter 11. Book), pp. 227 – 244. September 2011. ISBN 978-953-307-583-9. DOI: 10.5772/23025.

[A03] **Ali Hamada FAKRA**, *intégration de modèles d'éclairage à un code de calcul en bâtiment*; 205 pages. Livre édité à "Editions Universitaires Européennes" le 14 octobre 2017. ISBN 978-3-659-55842-9.

Actes de congrès publiés dans une revue internationale : **02**

[A04] **Fakra A. H.**, Boyer H., Lafosse Eddy. *The new method to determinate indoor daylighting the building: improving Lumen models*. Vol I – Vol. V, Septembre 2007; Ed. By Springer Berlin Heidelberg; ISBN: 978-3-540-75996-6.

[A05] A. N A. Randriantsoa, **D. Fakra**, M. P. Ranjaranimaro, M. N. M. Rachadi, J. C. Gatina, New Management Algorithms for Smart Electricity Network: Designing and Working Principles, Proceeding in Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC), Springer, 2020, *In press.*

B.2 Revues spécialisées avec comité de lecture (17)

Revues spécialisées avec comité de lecture (**publiées**) : **09**

[B01] D. Bigot, F. Miranville, **A. H. Fakra**, H. Boyer. A nodal thermal model for photovoltaic systems: impact on building temperature field and elements of validation for humid climatic conditions. Energy and Buildings, Elsevier, June 2009, 41: 1117-1126.

[B02] **A. H. Fakra**, H. Boyer, F. Miranville, D. Bigot. *A simple evaluation of global and diffuse Luminous efficacy for all sky conditions in tropical and humid climate*. Renewable Energy, Elsevier, January 2011, 36 : 298-306.

[B03] **A. H. Fakra,** F. Miranville, H. Boyer, S. Guichard. Development of a simple model to predict indoor daylighting: integration in CODYRUN software and validation. Energy Conversion and Management, Elsevier, July 2011, 52: 2724 – 2734.

[B04] F. Miranvile, **A. H. Fakra**, S. Guichard, H. Boyer, J. P. Praene, D. Bigot, *Evaluation of the thermal resistance of a roof-mounted multi-reflective radiant barrier for tropical and humid conditions: experimental study from field measurements*; Energy and Buildings, Elsevier, May 2012, 48: 79 – 90.

[B05] H. Boyer, **A. H. Fakra**, F. Miranville, B. Malet-Damour, S. Guichard, P. Lauret, *Evolution of CODYRUN from thermal simulation to coupled thermal and daylight simulation software*, Energy Procedia, Elsevier, 2014, 57 : 1916 – 1968.

[B06] B. Malet-Damour, H. Boyer, **A. H Fakra**, M. Bojic, *Light pipes performance prediction: inter model and experimental confrontation on vertical circular light-guides*, Energy Procedia, Elsevier, 2014, 57 : 1977 – 1986.

[B07] **D. Fakra**, A. J. Blazquez Recio, N. M. Murad, J. C. Gatina, A new affordable and quick experimental device for measuring the thermo-optical properties of translucent construction materials, Journal of Building Engineering, Elsevier, 2020, *In press*.

[B08] **D. Fakra**, D. A. S. Andriatoavina, N. A. M. N. Razafindralambo, K. A. Amarillis, J. M. M. Andriamampianina, A simple and low-cost integrative sensor system for methane (CH_4) and hydrogen (H_2) measurement, Sensor International Journal, Elsevier, 2020, *In press*.

[B09] **D. Fakra**, Blazquez Recio Alfonso José, Nour Mohammad Murad, Ando Ny Aina Randriantsoa, Jean Claude Gatina Experimental data and calibration processes to a new and simple device dedicated to the thermo-optical properties of a polycarbonate construction material, Journal of Data in Brief, Elsevier, 2020, *In press*.

Revues spécialisées avec comité de lecture (**en cours**) : **08**

[B010] J. P. Praene, **D. Fakra**, F. Menard, L. Ayagapin, M. N. M. Rachadi, The energy landscape of the Comoros:Furthering renewables for sustainable islands, Renewable Energy, Elsevier, *article soumis le 07/07/20*.

[B011] M. V. Randriamandimbisoa, N. A. M. N. Razafindralambo**, D. Fakra**, J. C. Gatina, Electrical response to plants in environmental stimuli: a short review and perspectives in meteorological applications, Sensor International Journal, Elsevier, *article soumis le 11/08/20*.

[B012] M. N. M. Rachadi, A. N. A. Randriantsoa, **D. Fakra**, M. P. Ranjaranimaro, J. C. Gatina, SMARTEN V1.0: a multiscale tool for simulating smart grid management - Reliability tests by comparison with HOMER software, Computers & Electrical Engineering Journal, Elsevier, *article soumis le 18/08/20*.

[B013] D. A. S. Andriatoavina, **D. Fakra**, N. A. M. N. Razafindralambo, J. P. Praene, J. M. M. Andriamampianina, Recent progress in the use of syngas and syngas blends in spark-ignition engines: A short review and S.W.O.T. analysis, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Elsevier, *article soumis le 31/08/20*.

[B014] A. N. A. Randriantsoa, **D. Fakra**, L. Rakotondrajaona, S. W. Jacobus Van Der Merwed, Recent advances in hybrid energy harvesting technologies from the road pavements : A review of the technical possibility using piezo-thermoelectrical combinations, International Journal of Pavement Research and Technology, Springer, *article en cours de soumission*.

[B015] **D. Fakra**, M. V. Randriamandimbisoa, N. A. M. N. Razafindralambo**,** J. C. Gatina, Biosensors dedicated to the environment from biological plant: new approach for measuring the micro-climate, Sensor International Journal , Elsevier, *article en cours de soumission*.

[B016] L. Rakoto, A. N. A. Randriantsoa, **D. A. H. Fakra**, S. W. Jacobus Van Der Merwed, A new piezo-thermoelectrical modeling for a roadway energy harversting system and experimental validation, *Applied Energy, article en cours de soumission*.

[B017] A. N. A. Randriantsoa, L. Rakoto, **D. A. H. Fakra**, S. W. Jacobus Van Der Merwed, An Experimental reference values caracterization of a roadway energy harversting system, Data in Biref, *article en cours de soumission*.

B.3 Congrès et conférences avec actes publiés (21)

Congrès nationaux avec actes à diffusion restreinte

[C01] **Fakra A. H.** *Request-answer of an energy system in variable and very variable mode: The case of the Aeolian and the Photovoltaic (PV)*. Colloque A.R.E.R (Agence Régionale de l'Energie Réunion); Octobre; 2005. Réunion – France.

[C02] **Fakra A. H.** ; Boyer H. *Intégration d'un modèle d'éclairement naturel dans le logiciel CODYRUN*. Colloque Equilibre environnementaux, énergie renouvelable et développements urbains. Revue angliciste de La Réunion ; N°29 – II. Mars ; 2007. Saint-Denis ; Réunion – France.

Congrès internationaux avec actes publiés

[C03] Garde F.; Bastide A. ; Bentaleb D. ; **Fakra A. H**. ; Ottenwelter E. ; Pothin E. ; Ferjani N. *Réalisation d'un bâtiment à énergie positive à l'île de la Réunion. Présentation d'une nouvelle approche de conception en phase d'étude*. ESIM 2006; Juin ; 2006. Toronto ; Canada.

[C04] **Fakra A. H.** ; Garde F. ; Manicom J. F. ; Phillipe P. *Modeling of a photovoltaïc system in variable mode : approach by networks of Bayesian neurons (ANN)*. Renewable Energy Congress by ISES. Octobre ; 2006. Chiba; Japon

[C05] **Fakra A. H.**; Boyer H. ; Lafosse Eddy. *The new method to determinate indoor daylighting the building: improving Lumen models*. ISES Solar World Congress 2007. Septembre ; 2007. Beijing; Chine.

[C06] **Fakra A. H.** ; Boyer H. ; Maamari F. *Experimental validation for software DIALUX : application in CIE test cases for building daylighting simulation*. COBEE (First International Conference on Building Energy and Environment), Aout;2008. Dalian, Chine.

[C07] **Fakra A. H.** ; Miranville F.; Bigot D.; Boyer H. *Element of validation of artificial lighting through the software CODYRUN: application to a test case of CIE*. IASTED Power and Energy System, September,2010. Gaborone, Botwana. p. 228-232.

[C08] Bigot D.; Miranville F.; Boyer H.; **Fakra A. H**. *A sensitivity analysis of a thermal model of photovoltaic panel*. IASTED Power and Energy System, September, 2010. Gaborone, Botwana. p. 211-217.

[C09] Moosafeer M.; **Fakra A. H.**; Boyer H.; Miranville F.; *Experimental validation of numerical simulation in thermal building using the software CODYRUN*. International Smart Energy Networks of Cooperation for Substainable Development; Novi Sad; Serbia; July 4 – 7, 2011. ECOS 2011.

[C10] **Fakra A. H.**; Moosafeer M.; Boyer H.; Miranville F.; *Numerical simulation of daylighting using the software CODYRUN*. International Scientific Conference CISBAT 2011; Lausanne, Switzerland, September 14-16.

[C11] P. Jean A.; **Fakra A. H.**; Boyer H.; Miranville F.; *CODYRUN: artificial lighting simulation software for visual comfort and energy saving optimization*. International Scientific Conference CISBAT 2011; Lausanne, Switzerland, September 14-16.

[C12] S. Guichard, F. Miranville, H. Boyer, B. Malet-Damour, **A. H. Fakra**, *Influence des matériaux à changement de phase : confrontation numérique et experimentale* ; 3ième Colloque International CIFEM 2014, ART-5-34, Moroni, Comores, 5 au 7 mai 2014. http://www.cifem2018.org/doc/actes_cifem_2014.pdf

[C13] **A. H. Fakra**, M. Moosafer, J. C. Gatina, H. Boyer, B. Malet-Damour, O. Outassi, C. Méssaoudi, *Simulateur solaire dédié à la thermique du bâtiment* ; 3ième Colloque International CIFEM 2014, ART-1-11, Moroni, Comores, 5 au 7 mai 2014. http://www.cifem2018.org/doc/actes_cifem_2014.pdf

[C14] A.P. Jean, F. Miranville, H. Boyer, C. Adams, **A. H. Fakra**, M. A. Medina, F. Miranville, *De la simulation du comportement thermique d'une paroi à l'observation d'état : l'assimilation de données dans CODYRUN en vue de la validation des propriétés thermiques d'un matériau* ; 3ième Colloque International CIFEM 2014, ART-7-4, Moroni, Comores, 5 au 7 mai 2014. http://www.cifem2018.org/doc/actes_cifem_2014.pdf

[C15] S. Guichard, F. Miranville, H. Boyer, B. Malet-Damour, **A. H. Fakra**, *Influence des matériaux à changement de phase : confrontation numérique et experimentale* ; 3ième Colloque International CIFEM 2014, ART-5-34, Moroni, Comores, 5 au 7 mai 2014. http://www.cifem2018.org/doc/actes_cifem_2014.pdf

[C16] E. A. Nidhoimi, J. C. Gatina, J. P. Praene, **A. H. Fakra**, *Approche dynamique du fonctionnement énergétique d'un espace bâti et bilan carbone associé : application sur un gîte rural situé à Mayotte*; CIPE 2014, Décembre 2014, Antananarivo, Madagascar, 2014.

[C17] **D. Fakra**, D. Morau, K. Bayante, M. H. Radanielina, T. Rakotondramiarana, *Generalized protocol by systemic analysis for sizing a small scale gasifier engine system dedicated to power generation from biomass*, 11th International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection (SEEP 2018), 08 – 11 May, University of West Scotland, Paisley, UK, 2018.

[C18] **D. Fakra**, C. L. Javier, D. Morau, J. P. Praene, T. Rakotondramiarana A. Lauret, *SIZER: a software dedicated to simulating the optimum size of a small biomass gasifier system*, 3rd International Conference on Energy, Environment and Climate Change (ICEECC 2019), 2-4 July, The Westin Turtle Bay Resort & Spa, Balaclava, Mauritius, 2019.

[C19] **D. Fakra,** M. P. Ranjaranimaro, M. Nasroudine, J. C. Gatina, *A new algorithm management approach of house electrical smart grid and reliability test of the scenarios with Homer software*, 12th Internationnal Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection (SEEP 2019), 18-21 November, University of Sharjah, UAE, 2019 (Reférence de l'article accepté: SEEP10107).

[C20] M. N. Mohamed Rachadi, D. A. S. Andriatoavina, **D. Fakra**, M. P. Ranjaranimaro, J. C. Gatina, *A multi-scale calculation tool for the management of mixed electrical energy flows*, 12th Internationnal Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection (SEEP 2019), 18-21 November, University of Sharjah, UAE, 2019 (Reférence de l'article accepté: SEEP10142).

[C21] D. A. S. Andriatoavina, **D. Fakra**, J. P. Praene, J. M. M.Aandriamampianina, Engine performances study of syngas mixed with bio-energy additives, 8th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation – (WasteEng2020), 12-15 july 2021 (reporté en 2021 à cause du Covid-19), Guelph, Canada. (article accepté).

B.4 Séminaires sans actes publiés (12)

[D01] **D. A. H. Fakra**, Intitulé du séminaire : *La simulation numérique en thermique du bâtiment à travers le logiciel CODYRUN*. I.U.T des Comores, département Génie de l'Habitat, Université des Comores, 10 juin 2008, aux Comores.

[D02] **D. A. H. Fakra,** Intitulé du séminaire : *Comment rédiger un article scientifique.* Faculté des Sciences et Techniques de l'université des Comores, 20 juin 2008, aux Comores.

[D03] **D. A. H. Fakra,** Intitulé de l'atelier de réflexion : *Politique énergétique des Comores : verrous et perspectives depuis 1976 à nos jours.* I.U.T des Comores, IFERE de l'université des Comores, 25 juin 2008, aux Comores.

[D04] **D. A. H. Fakra,** Intitulé du séminaire : *Comment présenter ses travaux de recherche à l'oral dans des congrès et conférences.* Faculté des Sciences et Techniques de l'université des Comores, 05 janvier 2009, aux Comores.

[D05] **D. A. H. Fakra**, Intitulé du séminaire : *Comment organiser son temps de travail efficacement à l'université : quelques techniques de management dédiés aux étudiants*. Faculté des Sciences et Techniques de l'université des Comores, 06 janvier 2009, aux Comores.

[D06] **D. A. H. Fakra,** Intitulé du séminaire : *Techniques d'étalonnage des capteurs de mesure.* I.S.T d'Antananarivo, Département Génie Civil, 11 mars 2019, Madagascar.

[D07] **D. A. H. Fakra,** Intitulé du séminaire : *La technologie low-cost de précision : mythe ou réalité*. I.S.T d'Antananarivo, Département de Génie Industriel, 21 janvier 2020, Madagascar.

[D08] **D. A. H. Fakra**, Intitulé du séminaire : *Démarche pour mener convenablement des projets de recherche dans les pays du Sud : le cas des Comores*. Faculté des Sciences et Techniques de l'université des Comores, 24 mars 2020, aux Comores.

Séminaires au sein du Laboratoire PIMENT : **04**

[D09] **D. A. H. Fakra**, Intitulé du séminaire : *L'étalonnage des instruments de mesures physiques : cas de la station météorologique du Laboratoire*. 04 septembre 2015, Campus Sud du Tampon, île de la Réunion.

[D10] **D. A. H. Fakra**, Intitulé du séminaire : *Formation sur les instruments de mesures de la compagnie Campbell*, 31 août 2018, Campus Sud du Tampon, île de la Réunion.

[D11] **D. A. H. Fakra**, J. Vigneron. Intitulé du séminaire : *Bilan du service Technique du laboratoire PIMENT et proposition d'une future réorganisation*. Assemblée Générale du Laboratoire PIMENT, 03 juin 2016, île de la Réunion.

[D12] **D. A. H. Fakra**, J. Vigneron. Intitulé du séminaire : *Présentation et bilan du pôle Instrumentation et expérimentation scientifique du Service Technique du laboratoire PIMENT*. Assemblée Générale du Laboratoire PIMENT, 04 décembre 2019, île de la Réunion.

B.5 Rapports et mémoires (15)

Rapports, fascicules et notes internes en lien direct avec la recherche : **12**

[E01] **D. A. H. Fakra,** *Conception et réalisation de deux Dispositifs expérimentaux (bancs d'essais) pour l'étude du couple sollicitation – réponse d'un système à énergie renouvelable : cas de l'éolienne et du photovoltaïque.* Laboratoire L.P.B.S. Université de La Réunion. Île de La Réunion, juin, 2004.

[E02] **D. A. H. Fakra** *Conception et mise en place de deux fascicules de Travaux Pratiques en énergies renouvelables dédiés aux étudiants en Licence professionnelle à l'IUT de Saint-Pierre.* IUT Saint-Pierre, Option : Génie Civil. Université de la Réunion. Île de La Réunion, Novembre 2004.

[E03] **D. A. H. Fakra** *Procédure BESTEST par application de la méthode sur le logiciel CODYRUN pour l'étude en thermique du bâtiment.* Rapport L.P.B.S, Université de la Réunion, juillet, 2005.

[E04] **D. A. H. Fakra** *Outil TRNSYS : étude en thermique du bâtiment et comparaison avec CODYRUN.* Rapport L.P.B.S. Université de la Réunion, Octobre, 2005. Île de La Réunion.

[E05] **D. A. H. Fakra**, Mise en place d'un protocole expérimental in situ et instrumentation pour l'étude du gisement solaire lumineux (éclairement extérieur) à La Réunion. Laboratoire L.P.B.S. Université de La Réunion. Île de La Réunion, janvier, 2008.

[E06] **D. A. H. Fakra**, Etude d'éclairement lumineux intérieur à La Réunion : expérimentation, instrumentation et mise en place d'une base donnée de référence en régime dynamique sur la cellule test (in situ) LGI. Laboratoire L.P.B.S. Université de La Réunion. Île de La Réunion, février, 2008.

[E07] **D. A. H. Fakra,** Fascicule de Travaux Pratiques (TP) expérimental en thermique du bâtiment : *conception et protocole expérimental d'un simulateur solaire dédié à l'étude du confort thermique humain à partir d'une maquette réduite d'habitation*. TP dédié aux étudiants de 2ière année en Licence Génie Civil et Environnement du département Science du Bâtiment et de l'Environnement (S.B.E) en 2015.

[E08] **D. A. H. Fakra**, Fascicule de Travaux Pratique (TP) expérimental en thermique des matériaux : *caractérisation de la conductivité thermique des matériaux de construction à partir d'une enceinte calorimétrique*. TP dédié aux étudiants de 1ière année en Licence Génie Civil et Environnement du département Science du Bâtiment et de l'Environnement (S.B.E) en 2015.

[E09] **D. A. H. Fakra,** Fascicule de Travaux Pratiques (TP) expérimentaux en Métrologie : *Etalonnage de thermocouples*. TP dédié aux étudiants de 2ière année en Licence Génie Civil et Environnement du département Science du Bâtiment et de l'Environnement (S.B.E) en 2019.

[E10] **D. A. H. Fakra,** Fascicule de Travaux Pratiques (TP) expérimentaux en métrologie thermique : *Conception d'un dispositif expérimental dédié à l'étude simultanée des propriétés thermo-physiques (conductivité, réflexivité, Transmitivité et absorptivité) d'un matériau de construction translucide et rédaction d'un protocole de mesures*. TP dédié aux étudiants de 3ière année en Licence Génie Civil et Environnement du département Science du Bâtiment et de l'Environnement (S.B.E) en 2019.

[E11] Andriatoavina D. A. S., **Fakra D. A. H.**, Fascicule de Travaux Pratiques (TP) expérimentaux en Génie des procédés : *Conception d'un électrolyseur dédié à l'étude du HHO (rendement, puissance, analyse du gaz, etc.) et rédaction d'un protocole de mesures*. TP dédié aux étudiants de 3ière année en Licence Génie Civil et Environnement du département Science du Bâtiment et de l'Environnement (S.B.E) en 2019.

[E12] Andriatoavina D. A. S., **Fakra D. A. H.,** Fascicule de Travaux Pratiques (TP) expérimentaux en Génie des procédés : *étude du rendement d'un moteur thermique ayant un carburant de mélange (HHO + diesel) et rédaction d'un protocole de mesures*. TP dédié aux étudiants de 3ière année en Licence Génie Civil et Environnement du département Science du Bâtiment et de l'Environnement (S.B.E) en 2020.

Mémoires : **03**

[E13] **Fakra, A. H.** *Intégration de modèles d'éclairage à un code de calcul physique du bâtiment: modélisation, validation et applications.* Thèse soutenue le 15 juin 2009, Option : Physique du bâtiment. Université de la Réunion, 2009, 189 p.

[E14] **Fakra, A. H.** *Etude du couple sollicitation – réponse d'un système énergétique en régime variable : application aux énergies renouvelables.* Mémoire de D.E.A, Université de La Réunion, 2004. Île de La Réunion.

[E15] **Fakra, A. H.** *Système solaire photovoltaïque pour le pompage d'eau.* Stage Ingénieur d'Application (niveau Maîtrise ès Science et Technique), 2001. Université Moulay Ismael. Maroc.

B.6 Participation à des projets (15)

Projets de recherche : **07**

[F01] **Projet Région Réunion** : F. Miranville (porteur du projet), H. Boyer, J. Sériacaroupin, **A. H. Fakra**, D. Calogine. Compléments d'instrumentation d'une cellule d'essais en environnements réel utilisée comme support de recherche pour la maitrise de l'énergie et le confort dans les bâtiments. Convention Conseil Régional de La Réunion / Université de La Réunion. Programme de recherche annuels 2007. Laboratoire L.P.B.S. Ile de La Réunion. Octobre 2007. Financement accordé en 2008 : 24 000 € (achevé en 2012).

[F02] **Projet Région Réunion** : F. Miranville (porteur du projet), H. Boyer, A. Jean, **A. H. Fakra**, S. Guichard, D. Bigot. Performance énergétique des Toitures Végétalisées à La Réunion : élaboration d'une règle experte (méta-modèle) de la résistance thermique des toitures Végétalisées (acronyme : PTVRun). Appel à projet 2010 du conseil régional de La Réunion (financement Recherche & innovation). Financement accordé en 2011 : 21 000 € (achevé en 2014).

[F03] **Projet de recherche du Ministère chargé de l'Outre-Mer (MOM)** : F. Miranville, H. Boyer, Stéphane Guichard, Dimitri Bigot, Aurélien Jean **A. H. Fakra**, Identification de matériaux à changement de phase locaux pour la protection solaire passive des bâtiments (acronyme : MCPRUN). Financement accordé en 2012 : 30 000 € (achevé en 2015).

[F04] **Appel à projet (interne) de l'UFR S.H.E (Université de la Réunion)** : **D. Fakra** (co-porteur), Jean Claude Gatina. Achat d'un mini-gazogène instrumenté dédié à la formation et la recherche, Financement accordé en juin 2018 : 30 000 €.

[F05] **Projet FEDER**. Intitulé du projet : MCPi-Bât. Porteurs : Fréderic Miranville, Bruno-mallet Damour, Harry Boyer, Dimitri Bigot. Financement : 739 141 €. J'ai participé à la rédaction du dossier technique du projet et j'apporte ma contribution à l'appui technique du projet. Financement accordé en octobre 2019 pour une durée de trois années.

[F06] **Projet FEDER à travers un Appel à Manifestions d'Intérêts (A.M.I) de la Région Réunion**. Intitulé du projet : SYNBIOZER. Porteurs : Dominique Morau, **Damien Fakra**, Mamy Harimisa Radanielina. Financement accordé en septembre 2020 pour une durée de deux années : 677 033 €.

[F07] **Appel à projet (interne) de l'UFR S.H.E (Université de la Réunion)** : Dominique Morau, Jean Claude Gatina, **D. Fakra** (co-porteur). Achat matériel de mesure gazogène, Financement accordé en avril 2020 : 21 679 €.

Missions de collaboration : **02**

[F08] **Appel à projet (interne) de la Direction des Relations Internationale (Université de la Réunion)** : **D. Fakra** (porteur). Demande de financement pour une prospection dans deux universités d'Afrique du Sud (Johannesburg et Pretoria). Financement accordé : 1466 €. Période : 30/10/18 au 06/11/18.

[F09] **Appel à projet (interne) de la Direction des Relations Internationale (Université de la Réunion)** : **D. Fakra** (porteur). Demande de financement pour une prospection à l'université de Sharjah (Emirats Arabes Unis). Financement accordé : 1999 €. Période : 16/11/18 au 23/11/19.

Projets de formation : **06**

[F10] **Projet MIC (Mobilité Internationale de Crédits) 2019 (ERASMUS+)** : **D. Fakra** (co-porteur), J. P. Praene (co-porteur). Projet d'échanges d'enseignants et d'étudiants inter-universitaires entre l'université de la Réunion (France) et University of Witwatersrand (WITS) de Johannesburg (Afrique du Sud). Financement accordé en juillet 2019 : 79 896 € (en cours jusqu'en 2022).

[F11] **Appel à Projet (interne) de l'Université de La Réunion** : **D. Fakra** (porteur). Demande de financement pour un Professeur invité au sein du département S.B.E durant 1 semaine à l'université de La Réunion. Financement accordé en septembre 2019 : 1 833 € (achevé en 2019).

[F12] **Projet MIC (Mobilité Internationale de Crédits) 2019 (ERASMUS+)** : **D. Fakra** (co-porteur), J. P. Praene (co-porteur). Projet d'échanges d'enseignants et d'étudiants inter-universitaires entre l'université de la Réunion (France) et University of Pretoria (Afrique du Sud). Financement accordé en juillet 2020 : 40 000 € (en cours jusqu'en 2023).

[F13] **Projet MIC (Mobilité Internationale de Crédits) 2019 (ERASMUS+)** : J. C. Gatina (porteur). Projet d'échanges d'enseignants et d'étudiants inter-universitaires entre l'université de la Réunion (France) et l'université des Comores (Aux Comores). Financement accordé en octobre 2019 : 159 695 € (en cours jusqu'en 2022). Mon implication dans le projet : renforcement des capacités du corps enseignant et des chercheurs de l'université des Comores, accompagnement sur les stratégies de la recherche et la structuration d'une école doctorale à l'université des Comores, encadrements de stagiaires, de doctorants et personnel de l'université des Comores, formateur, coresponsable de la licences SE3B du département MPCI de la FST de l'université des Comores en codiplomation avec l'université de la Réunion.

[F14] **Projet MIC (Mobilité Internationale de Crédits) 2018 (ERASMUS+)** : J. P. Praene (porteur). Projet d'échanges d'enseignants et d'étudiants inter-universitaires entre l'université de la Réunion (France) et l'Institut Supérieure et Technologique d'Antananarivo (Madagascar). Financement accordé en juillet 2020 : 169 580 € (en cours jusqu'en fin 2020). Ma participation au projet : renforcement des capacités du corps enseignant, encadrements des stagiaires et Doctorants de l'IST d'Antananarivo, formateur, accompagnement de la politique de recherche ainsi que de la création d'une école doctorale de l'IST d'Antananarivo.

[F15] **Projet de coopération ERASMUS+ et COI** : Référent université de La Réunion : J. C. Gatina. Intitulé du projet : Formation et Enseignement Supérieur pour la Transition énergétique dans les territoires Insulaires et en Indianocéanie (FESTII). Projet regroupant l'université de La Réunion (France), l'université de Laguna (Espagne), l'université des Ançores (Portugal), l'université des Comores (Comores), l'IST d'Antananarivo (Madagascar), l'IST d'Antsiranana (Madagascar), l'université de Maurice (Maurice), l'université des Mascareignes (Maurice). Financement : 826 038 €. Début du projet : février 2020. Durée : trois années. Mon implication : référent technique du projet au niveau de l'université de La Réunion.

Table des figures

3.1 Les contributions apportées au logiciel CODYRUN 14
3.2 Algorithme de calcul du code d'éclairage/éclairement intérieur utilisé dans CODYRUN 15
3.3 Comparaison éclairement naturel : mesures vs logiciel CODYRUN 17

4.1 Composante d'un mini-gazogène et objectif de l'étude 25
4.2 Modélisation systémique du mini gazogène implémenté dans SIZER 27
4.3 Interface graphique du logiciel SIZER (entrées, sorties et paramètres) . . . 33
4.4 Composition du syngaz produit par chaque gazogène et comparaison avec SIZER [2] 34
4.5 Pouvoir calorifique inférieur du syngaz produit par chaque gazogène et comparaison avec SIZER [2] 34
4.6 Gazogène G.E.K (`http://www.allpowerlabs.com/products/gasifier-kits`) 35
4.7 Dimension du cyclone G.E.K 36

5.1 Niveau d'échelle de simulation sous SMARTEN 46
5.2 Relation entre les systèmes 47
5.3 Schéma du processus de la strategie 1 48
5.4 Organigramme de la stratégie 1 49
5.5 Organigramme du sous-programme de calcul de la stratégie 1 50
5.6 Schéma systémique du processus de la stratégie 2 52
5.7 Organigramme de la stratégie 2 53
5.8 Organigramme du sous-programme de calcul de la stratégie 2 - Partie 1 . . 54
5.9 Organigramme du sous-programme de calcul de la stratégie 2 - Partie 2 . . 55
5.10 Organigramme du sous-programme de calcul de la stratégie 2 - Partie 3 . . 56
5.11 Variation des données sur SMARTEN 59
5.12 Variation du système de stockage et erreur relative pour le bâtiment résidentiel 1 60
5.13 Variation de l'extraction du réseau et erreur relative pour le bâtiment résidentiel 1 60
5.14 Variation du système de stockage et erreur relative pour Bâtiment commercial 61
5.15 Variation de l'extraction de la grille et erreur relative pour Bâtiment commercial 61
5.16 Représentation graphique de SMARTEN : fenêtre principale 63
5.17 Visualisation 2D sous SMARTEN 63

6.1 Phénomènes de réflexion au sein de la sphère : (a) Modèle de flux réfléchi sur une surface Lambertienne / (b) Réflexions multiples dans une sphère d'intégration 75
6.2 Double sphère d'intégration pour la mesure simultanée de la réflectance (un capteur en position A) et de la transmittance (deux capteurs en position B et C) pour un échantillon donné (voir [Car97]) 77
6.3 Technique de la mesure de la conductivité thermique en régime permanent 79
6.4 Positionnement des capteurs A, B et C sur le dispositif experimental McM . 81
6.5 Conception et lois associées au Multi-Coef-Meter ou McM : mesures de la conductivité thermique ainsi que de la transmittance, reflectance et absorptance optique d'un matériau de construction complexe 82
6.6 Échantillons testés (de la gauche vers la droite) : le fer, le bois, le polystyrène et le polycarbonate 83

7.1 Dimensions de la capsule partiellement fermée des capteur MQ 92
7.2 Dispositif de mesure des gaz constitué d'un capteur avec une minicapsule partiellement fermée, une carte Arduino, une seringue et un ordinateur . . 92
7.3 Variation de la concentration de CH_4 mesurée en fonction du volume injecté pour 6 séries de mesure dans une capsule partiellement fermée 94
7.4 Position du MQ-8 pour la mesure du H_2 dans le capsule 95
7.5 Variation de la concentration de H_2 mesurée en fonction du volume injecté pour un mélange de 60 ml (2 à 8 ml de H_2) 96

8.1 Plantes assujetties à l'expérimentation 105
8.2 Enceinte climatique dédiée aux expérimentations 107
8.3 Dimensions de l'enceinte climatique 108
8.4 Chaîne d'acquisition de l'expérimentation 109
8.5 Positionnement des fils de mesure du signal de la plante : un fil d'alliage cuivre-nickel enterré au sol et un autre constitué uniquement de cuivre piqué à la tige de la plante. 109
8.6 Positionnement des capteurs de mesures de références sur l'ambiance intérieure : un thermocouple de type T pour la mesure de température et un capteur BMP/BME280 pour la mesure de l'humidité relative. 109
8.7 Valeurs mesurées du signal sur les six plantes sélectionnées en milieu in situ 110
8.8 Mesure sur un montage en série de 10 pots de robinia 110
8.9 graphe des variables 112
8.10 Variation du signal de la plante en fonction de la température de l'air ambiant 114
8.11 Variation du signal de la plante en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant 114

9.1 Synoptique de la démarche en métrologie lowt-cost dédiée à la recherche des pays du Sud 125

12.1 Répartition de mes enseignements de niveau Bac+1 à Bac+5 : par niveau (a), par type (b) et par nature (c) 142
12.2 Répartition de mes encadrements de niveau Bac+3 à Doctorat : par niveau (a), par type (b) et par pourcentage d'encadrement (c) 143

Liste des tableaux

3.1 Récapitulatif : degré de fiabilité du logiciel CODYRUN à simuler l'éclairement naturel et l'éclairage artificiel 16

4.1 Entrées, sorties et paramètres d'un mini-gazogène constitué d'un souffleur, d'un brûleur, d'un cyclone, de plusieurs tuyauteries et d'un moteur électrique 30
4.2 Quelques équations sous *SIZER* 31
4.3 Composition (en %) de la biomasse utilisée dans chaque dispositif et moyenne de cette composition. 32
4.4 Comparaison entre le système G.E.K et la simulation optimisée dans SIZER 35

5.1 Liste des données de la stratégie 1 48
5.2 Liste des données nécessaires à la stratégie 2 52
5.3 Les paramètres de la simulation dans SMARTEN 59
5.4 Erreurs relatives commises par SMARTEN par rapport au logiciel de simulation HOMER pour la gestion du mix énergétique dans un bâtiment 62

6.1 Flux et données de mesure de chaque matériau de réference 80
6.2 Valeurs mesurées par la photodiode (capteur optique) sur les 4 échantillons 81
6.3 Dimenssions des matériaux de références utilisés lors des tests de mesures sur le McM 83
6.4 Récapitulatif des comparaisons entre les mesures du McM et les valeurs de référence 84

7.1 Détermination du coefficient d'étalonnage du MQ-4 95
7.2 Détermination du coefficient d'étalonnage du MQ-8 95

8.1 Circonférence du tronc des espèces vivantes sélectionnées 106
8.2 Détermination de l'indice foliaire 106
8.3 Indice foliaire des individus 107
8.4 Conductivité électrique des électrodes 107
8.5 Matrice des corrélations 111

9.1 Synthèse des six thématiques de recherche abordées dans le manuscrit . . 127

10.1 Vacation à l'IUT de Saint-Pierre (année 2005-2007) 131
10.2 Année 2007-2008 (A.T.E.R à mi-temps = 96 HETD) 132
10.3 Année 2008-2009 (A.T.E.R à temps plein = 192 HETD) 132

10.4 Année 2009-2010 (A.T.E.R à mi-temps = 96 HETD) 132
10.5 Chargé d'Enseignement Vacataire de 2011 à nos jours 133
10.6 Mission du 05 juin au 3 juillet 2008 à l'IUT des Comores 133
10.7 Mission du 17 décembre 2008 au 07 janvier 2009 134
10.8 Mission du 04 au 30 décembre 2009 134
10.9 Mission du 26 février au 11 mars 2020 134

Colophon

Ce H.D.R a été rédigé sous l'environnement LaTeX 2_ε. Elle utilise le style *Clean Thesis* développé par Ricardo Langner. La conception du style *Clean Thesis* est inspirée des documents du guide de l'utilisateur d'Apple Inc.

Le modèle utilisé pour rédiger ce H.D.R peut être téléchargé sur le site suivant : `http://cleanthesis.der-ric.de/`.

Declaration

Je soussigné Damien Ali Hamada FAKRA, Ingénieur d'Etude à l'université de la Réunion, être l'auteur de ce manuscrit d'Habilitation à Diriger des Recherches (H.D.R).

Le Tampon, Soutenue le 07 décembre 2020

Docteur / Ingénieur Damien Ali
Hamada FAKRA