

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	ii
Acronymes et abréviations.....	iv
Liste des figures.....	vi
Introduction générale.....	1
Partie 1 : SYNTHÈSE DE TRAVAUX	5
Volet I : DEVELOPPEMENT D'OUTILS SCIENTIFIQUES	6
I.1. Un algorithme d'automatisation de l'analyse de sensibilité globale baptisé GoSAT	6
I.2. Outil de description et de modélisation systémique du fonctionnement énergétique des espaces bâtis	15
Volet II : EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BATIMENTS	17
II.1. Bref état des lieux de l'habitat à Madagascar	17
II.2. Proposition de solutions passives en utilisant des matériaux disponibles localement	19
II.3. Étude de la performance énergétique des toits verts.....	21
Volet III : MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE RENOUVELABLE	25
III.1. Étude théorique d'un système de climatisation solaire à déshydratant liquide.....	25
III.2. Évaluation du potentiel en énergie solaire de huit sites principaux de Madagascar en vue la production d'électricité avec des centrales « dish stirling ».....	26
III.3. Étude technico-économique de la récupération d'excès de chaleur au niveau d'un centre de cure thermique pour la production d'eau chaude sanitaire d'un Hôtel à Antsirabe.....	29
III.4. Analyse de sensibilité paramétrique pour optimiser un système de rafraîchissement solaire à absorption	31
III.5. Étude expérimentale de la co-digestion anaérobie de quelques déchets organiques à Madagascar	33
III.6. Étude théorique d'un séchoir-serre à moindre coût pour les produits agricoles	35
Volet IV : ÉTUDE THÉORIQUE DES ÉCOULEMENTS DANS UN RÉSERVOIR PÉTROLIER - CAS DE TSIMIRORO MADAGASCAR	37
Volet V : TRAITEMENTS DES BOUES DES STATIONS D'ÉPURATION EN VUE DE LEUR VALORISATION ÉNERGÉTIQUE	39
V.1. Séchage thermique des boues des stations d'épuration	39
V.2. Étude théorique et expérimentale de la méthanisation des boues des stations d'épuration	43

Partie 2 : BILAN ET PERSPECTIVES	45
Volet VI : BILAN DE MES ACTIVITES D'ENCADREMENT DE TRAVAUX DE RECHERCHE VU SOUS L'ANGLE DE LA REUSSITE ACADEMIQUE OU DE L'INSERTION PROFESSIONNELLE DE MES EX-ENCADRES.....	46
VI.1. Introduction	46
VI.2. Productions scientifiques de mes ex-encadrés en DEA/Master	46
VI.3. Autres indicateurs montrant les capacités de mes ex-encadrés en DEA.....	48
VI.4. Bilan des occupations de mes ex-encadrés suite à l'obtention de leurs diplômes.....	49
VI.5. Résultats de l'encadrement des étudiants de la formation Master du parcours Energétique	51
VI.6. Conclusion	52
Volet VII : PERSPECTIVES ET PROJETS DE RECHERCHE	54
VII.1. Introduction	54
VII.2. Perspectives à court terme	56
VII.3. Perspectives à moyen terme.....	59
VII.4. Perspectives à long terme.....	62
VII.5. Conclusion	67
Conclusion générale	68
Références bibliographiques.....	71

Acronymes et abréviations

ACV : Analyse du Cycle de Vie

ADER : Agence du Développement de l'Électrification Rurale

AEA : Attestation d'Études Approfondies

AGV : Acides Gras Volatiles

BioD : appellation du biodigesteur domestique mis au point par l'équipe de l'IME

BMP : Biochemical Methane Potential

CeRSAE : Centre de Ressources Scientifiques pour l'Agriculture et l'Environnement

CDD : Cooling Degree Days

COP : Coefficient de performance

CUA : Commune Urbaine d'Antananarivo

CV : Curriculum Vitae

BDO5 : Demande Biochimique en Oxygène

DCO : Demande Chimique en Oxygène

DEA : Diplôme d'Études Approfondies

DEGS (Faculté) : Faculté de Droit, Economie, Gestion et Sociologie de l'Université d'Antananarivo

DESS : Diplôme d'Études Supérieures Spécialisées

DUEN : Délégation Universitaire aux Énergies Nouvelles

DUMEE : Diplôme d'Université en Maîtrise de l'Énergie et de l'Environnement (La Réunion)

EIE : Étude d'Impacts Environnementaux

ESPA : École Supérieure Polytechniques d'Antananarivo

FAST : Fourier Amplitude Sensitivity Test

FFT : Fast Fourier Transform

FNE : Fonds National de l'Électricité

FOFIFA : Foibem-pirenena momba ny Fikarohana ampiarina amin'ny Fampanandrosoana ny eny
Ambanivohitra (ou Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural
(CENRADERU))

GoSAT : GLObal Sensitivity Analysis Tool (outil d'analyse de sensibilité globale [2])

HDD : Heating Degree Days

HDR : Habilitation à Diriger des Recherches

HEPMAD : High-Energy Physics International Conference – Madagascar

IME : Institut pour la Maîtrise de l'Energie

IST : Institut Supérieur de Technologies

JIRAMA : Jiro sy Rano Malagasy (Société d'état de distribution d'électricité et d'eau potable)

KU (Leuven) : Katholieke Universiteit Leuven (Université Catholique de Leuven en Belgique)

LAI : Leaf Area Index (indice de surface foliaire)

LAMPS-GME : Laboratoire de Mathématiques Et Physique - Groupe de Mécanique Energétique
(Perpignan – France)

LAPLACE : Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie (Toulouse – France)

LBE : Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (Narbonne – France)

LEAP : Long-range Energy Alternatives Planning System [88]

LMD : Licence – Master – Doctorat

LMDI : Logarithmic Mean Divisia Index

L TTC : Laboratoire de Thermodynamique Thermique et Combustion (Antananarivo – Madagascar)

MAX : opérateur mathématique calculant le maximum des éléments d'un vecteur ou d'une matrice

MCP : Matériaux à Changement de Phase

NUT : Nombre d'Unités de Transfert

OMPI : Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle

OMAPI : Office Malgache des Propriétés Industrielles

ONG : Organisation Non Gouvernementale

PIMENT : Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie, l'environnement et le bâtiment

SAAO : South African Astronomical Observatory (Cape Town – Afrique du Sud)

SAC : Solar Absorption Cooling plant

TFG : Paramètre interne de GoSAT défini par l'équation (19) de la page 12 du présent mémoire

UOI : Université de l'Océan Indien

Liste des figures

Fig. I.1.: Eléments à annuler du vecteur <i>TFG</i>	13
Fig. I.2. Description systémique des espaces bâtis.....	15
Fig. II.1. Degrés-jours de chauffage (HDD) et de rafraîchissement (CDD) pour de la ville d'Antananarivo en 2007	20
Fig. II.2. Plan de l'habitat type choisi.....	21
Fig. II.3. Schéma d'une toiture végétalisée	22
Fig. II.4. Profils d'un toit vert et d'un toit conventionnel	22
Fig. II.5. Les paramètres les plus influents sur la performance énergétique d'un bâtiment non-isolé	24
Fig. III.1. Configuration du système de climatisation solaire étudié	26
Fig. III.2. Configuration du système de chauffage solaire à eau.....	26
Fig. III.3. Localisations géographiques des huit sites concernés par l'investigation	27
Fig. III.4. Schéma synoptique des phénomènes ayant lieu au niveau d'un système « dish stirling »...	28
Fig. III.5. Localisation du projet de transport d'eau chaude à partir du centre de cure thermale jusqu'à l'Hôtel des Thermes de la Ville d'Antsirabe	30
Fig. III.6. Schéma du système de récupération d'excès de chaleur à étudier	30
Fig. III.7.a. Schéma synoptique de l'installation SAC.....	31
Fig. III.7.b. Photographies du système de climatisation solaire à absorption (SAC) considéré	31
Fig. III.8. Schéma du séchoir-serre triangulaire isocèle modélisé	36
Fig. IV.1. Schéma du réservoir avec quatre puits d'injection aux coins et un puits de production au milieu	37
Fig. V.1. Photographie du système de séchage modélisé et utilisé pour l'expérimentation menée à l'intérieur d'une station d'épuration (Saint Pierre – La Réunion).....	39
Fig. V.2. Ordre de prépondérance des paramètres les plus influents du modèle associé à l'enceinte de séchage seul.....	40
Fig. V.3. Courbe de séchage des boues sur chaque claie	41
Fig. V.4. Schémas descriptifs du séchoir-serre étudié.....	42
Fig. V.5. Photographie du dispositif expérimentale de méthanisation [20, 99]	44
Fig. VI.1. Synthèse des productions scientifiques de mes 31 ex-encadrés de DEA/Master dans les deux formations confondues	47
Fig. VI.2. Synthèse des productions scientifiques de mes 11 ex-encadrés de DEA.....	47
Fig. VI.3. Suites des cursus académiques de mes ex-encadrés en DEA.....	48
Fig. V.4. Reconnaissance internationale des capacités de mes ex-encadrés en DEA	49
Fig. V.5. Occupations post DEA/Master de mes ex-encadrés	50

Introduction générale

L'épuisement des sources d'énergies fossiles se profile à l'horizon 2030 et chaque gouvernement s'efforce d'adopter une politique énergétique visant à atténuer les impacts socio-économiques de la transition énergétique à laquelle le monde doit faire face présentement. Sur le plan de la recherche scientifique, les crises pétrolières des années 70 ont déjà résulté l'accroissement des moyens mis à disposition mondialement pour multiplier les travaux de recherche portant sur les sources d'énergies alternatives et renouvelables. Madagascar n'est pas en reste en dépit de ses moyens très limités. En effet, l'énergie renouvelable figure parmi les axes de recherche prioritaires définis par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique malgache dans la Stratégie Nationale de la Recherche Scientifique à Madagascar¹. Par ailleurs, le Document d'Etude de la Politique et Stratégie de l'Energie à Madagascar met un accent sur le développement de l'énergie renouvelable².

Historiquement, la recherche malgache sur les énergies renouvelables date déjà de plus d'une trentaine d'année. Plus précisément, l'Université d'Antananarivo a mis en place, en 1982, la Délégation Universitaire aux Energies Nouvelles (DUEN) connue aujourd'hui sous la dénomination d'Institut pour la Maîtrise de l'Energie (IME) sous l'égide duquel plusieurs travaux de recherche en énergétique ont pu être réalisés dans le cadre de la préparation de thèses de Doctorat et de mémoires de Diplôme d'Études Approfondies (DEA) et/ou de Master. Vers la seconde moitié des années 90, d'autres équipes de recherche de l'Université de Fianarantsoa et de l'Université Nord Antsiranana, ont également opté d'orienter leurs travaux de recherche sur ce vaste thème.

Par ailleurs, un programme financé par la Commission européenne a été réalisé, entre 1999 et 2005, en vue de mettre en réseau les institutions d'enseignement et de recherche des îles de l'Océan Indien. Une université sans murs, baptisée Université de l'Océan Indien (UOI), a donc été mise en œuvre et a organisé des sessions de formations de 2nd cycle universitaire sur diverses thématiques dont, entre autres, l'Energie et l'Environnement. Bien que les activités de l'UOI cessassent, certains réseaux d'institutions mis en place par ce programme, particulièrement ceux de la thématique Energie et Environnement, continuaient leur partenariat. Ainsi, une formation rassemblant les thèmes Energie, Environnement, Génie civil et Urbanisme, est organisée à l'Institut Supérieur de Technologie (IST) d'Antananarivo depuis 2008. Les intervenants de cette formation, qualifiée de « délocalisée » du fait qu'elle est sanctionnée par un diplôme de Master délivré par l'Université de la Réunion tout en étant hébergée par l'IST d'Antananarivo, sont composés des enseignants-chercheurs issus des institutions d'enseignement et de recherche de la région, notamment ceux du laboratoire PIMENT de l'Université de la Réunion, de l'IST Antananarivo, de l'Ecole Supérieure Polytechniques d'Antananarivo (ESPA) et de l'IME ainsi que du Département de Physique de la Faculté des Sciences d'Antananarivo où je suis affilié.

Il convient de noter que j'ai eu le privilège d'avoir été parmi les quatre étudiants malgaches sélectionnés pour bénéficier une bourse de l'UOI afin de suivre durant 6 mois une formation du 2nd cycle universitaire portant sur le thème de l'Energie et Environnement (Diplôme d'Université en Maîtrise de l'Energie et de l'Environnement - DUMEE) organisée à l'Université de la Réunion en 1999.

¹ URL : www.mesupres.gov.mg/IMG/pdf/SNR_DOCUMENT_MAI_2013.pdf (visité le 13 janvier 2016)

² URL : www.ore.mg/Publication/Rapports/NouvellePolitiqueDel'Energie.pdf (visité le 15 janvier 2016)

Ensuite, l'UOI m'a également accordé une autre bourse me permettant de séjourner durant 4 mois à la Réunion pour débiter ma thèse [1] en 2000. En outre, ayant été intégré dans le corps des Maîtres de Conférences du Département de Physique de l'Université d'Antananarivo en juillet 2006, j'interviens également dans la formation de Master délocalisée pour dispenser des cours et encadrer des travaux de préparation de mémoires depuis son ouverture à l'IST d'Antananarivo en 2008 jusqu'à présent.

De par sa grande superficie géographique, son taux de croissance démographique plus élevé et sa capacité économique plus limitée, les problématiques énergétiques de la Grande île peuvent se différencier de celles des autres espaces insulaires de la zone de l'Océan Indien, notamment en termes de consommation énergétique, de mix énergétique et de potentiels énergétiques inexploités. Cependant, il y a aussi certains sujets de recherche sur la maîtrise de l'énergie renouvelable et plus généralement sur le génie d'énergétique, lesquels intéressent communément les pays de cette zone. Il s'agit, par exemple, des problématiques relatives au confort thermique de l'habitat et à la maîtrise de l'énergie solaire en zone tropicale humide ainsi qu'à la valorisation énergétique des déchets. Aussi, dans le but de mutualiser les moyens matériels et de renforcer les échanges de connaissances et d'expériences ainsi que de travailler en synergie, la collaboration scientifique déjà initiée depuis plus d'une quinzaine d'années entre les chercheurs réunionnais et malgaches a été raffermie pour traiter efficacement ensemble ces sujets de recherche énergétiques, en marge de l'organisation de la formation de Master délocalisée susmentionnée. En effet, un autre aspect caractérisant cette formation délocalisée est le fait de constituer une antichambre de détection de jeunes talents malgaches (ou comoriens) susceptibles de mener à bien des travaux de thèse ultérieurement. Dans cette optique, la formation étant initialement maquettée pour avoir une visée professionnelle, des sujets de recherche sur l'énergie renouvelable et l'environnement, sont parfois attribués à un certain nombre d'étudiants qui, au vu de leurs notes obtenues durant la phase théorique de cette formation de Master, présentent un fort potentiel intellectuel et manifestent leur intérêt à la recherche doctorale.

Compte tenu du défi lié à la transition énergétique, nombreux sous-thèmes de recherche sur l'énergétique sont encore à explorer et étudier pour développer le secteur Energie de Madagascar et des îles voisines. De plus, fière d'avoir été formé uniquement par des institutrices, enseignants et enseignants-chercheurs malgaches jusqu'à l'obtention de mon diplôme de DEA et un « produit » de la malgachisation temporaire du système éducatif malgache (1975-1990), j'ambitionne de devenir un jour un leader et manager d'une dynamique et innovante équipe de recherche scientifique ayant une notoriété reconnue internationalement. Dans ce dessein, lors de l'attribution de sujets de mémoires de DEA ou de Master aux étudiants dont la direction scientifique des travaux m'a été confiée, j'ai voulu relever le défi de pouvoir maîtriser et dominer, avec les moyens limités mis à la disposition de notre équipe et sans aucune mobilité à l'étranger, l'encadrement du traitement d'une large variété de sujets de recherche sur le domaine de l'Energétique, et autant que faire ce peut, ai visé à ce que chaque travail entrepris aboutisse non seulement à un mémoire mais aussi à un article scientifique publié dans un congrès ou une revue à audience internationale.

Ainsi, le présent document de synthèse des travaux effectués, lequel est dressé en vue de la rédaction de mon mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, se base essentiellement sur les résultats des travaux de préparation des mémoires de DEA et de Master des étudiants du Parcours Energétique du Département de Physique de l'Université d'Antananarivo et de ceux de la formation

de Master délocalisée précédemment citée. A ces mémoires, s'ajoutent toutefois deux thèses dont les préparations ont bénéficié de mes aides et conseils méthodologiques. Il ressort de ce qui précède que définir un fil conducteur reliant les divers objets de recherche synthétisés dans le présent document ne peut se faire qu'en employant des termes très génériques tels que énergie renouvelable, développement durable et maîtrise. Cependant, sachant qu'aucune équipe de recherche ne peut prétendre pouvoir résoudre à elle seule toutes les problématiques énergétiques du pays, le mot « contribution » est également adjoint à ces termes ; d'où l'intitulé que je compte attribuer à mon mémoire de HDR : « Contribution à la maîtrise de l'énergie renouvelable en vue du développement durable de Madagascar ».

Hormis les manuscrits qui sont encore en considération dans des journaux scientifiques, mes publications scientifiques se totalisent aujourd'hui au nombre de vingt [2-21]. Toutefois, le présent document de synthèse est basé sur dix articles [2-11] publiés dans des revues à audience internationale et sur 10 autres communications [12-21] publiées dans des actes de congrès internationaux. Ainsi, les objets de recherche discutés dans ce document peuvent se subdiviser en cinq sous-thématiques, à savoir :

- Développement d'outils scientifiques,
- Efficacité énergétique des bâtiments,
- Maîtrise de l'énergie renouvelable,
- Etude théorique des écoulements dans un réservoir pétrolier (dans le cadre de la transition énergétique).
- Traitements des boues des stations d'épuration en vue de leur valorisation énergétique

Ainsi, les lecteurs souhaitant avoir de plus ample information concernant les travaux de mon équipe peuvent se référer, outre mes publications [2,21], aux mémoires de DEA/Master [22-55] réalisés sous mon encadrement et aux thèses [56-57] préparées avec mes aides et conseils méthodologiques, lesquels sont consultables en ligne sur la base de données de la Bibliothèque Universitaire d'Antananarivo et celle de l'Université de la Réunion.

Par ailleurs, le fait de disposer à mon compte dix articles publiés dans des revues de notoriétés internationales [2-11], dix autres dans des actes de congrès internationaux à comité de lecture avec diffusion d'actes [12-21], témoigne déjà, du moins partiellement, d'une reconnaissance internationale de mon aptitude à animer une équipe de recherche scientifique ; chaque article de revue ayant en effet été examiné et rapporté par deux ou trois référents anonymes internationaux en plus des membres de l'équipe éditoriale du journal de parution de cette publication. Il en est de même pour les congrès internationaux à comité de lecture. Un exemple de cette reconnaissance internationale est le fait qu'avant même la soutenance de mon mémoire de HDR mais compte tenu du nombre de mes publications scientifiques, l'Université de La Réunion m'a déjà fait l'honneur de m'inviter à siéger, en tant qu'examinateur, parmi les membres du jury de la thèse d'une doctorante réunionnaise [58].

Subséquentement, les cinq premiers volets de la première partie du présent document de synthèse seront consacrés respectivement aux cinq sous-thématiques précédemment énumérées.

La deuxième partie du présent document de synthèse est consacrée à la présentation de bilan et perspectives. Plus précisément, cette deuxième partie est organisée en deux volets de la manière suivante :

- Le volet VI expose le bilan de mes activités d'encadrement de travaux de recherche vu sous l'angle de la réussite académique ou de l'insertion professionnelle de mes ex-encadrés.
- Le volet VII présente les «perspectives» pour montrer ma capacité à définir des objectifs à court, moyen et long termes et à programmer des activités y afférentes pour l'équipe de recherche dont j'aurai la responsabilité de diriger pour être capable non seulement de répondre efficacement aux futures sollicitations de recherche dictées notamment par les contextes socio-économiques nationaux, régionaux et internationaux, mais d'apporter aussi des innovations susceptibles d'intéresser la communauté scientifique et/ou le secteur productif.

Partie 1 : SYNTHÈSE DE TRAVAUX

Volet I : DEVELOPPEMENT D'OUTILS SCIENTIFIQUES :

I.1. Un algorithme d'automatisation de l'analyse de sensibilité globale baptisé GoSAT

I.2. Un outil de description et de modélisation systémique du fonctionnement énergétique des espaces bâtis

Volet II : EFFICACITE ENERGETIQUE DES BATIMENTS

II.1. Bref état des lieux de l'habitat à Madagascar

II.2. Proposition de solutions passives en utilisant des matériaux disponibles localement

II.3. Etudes de la performance énergétique des toits verts

Volet III : MAITRISE DE L'ENERGIE RENOUVELABLE

III.1. Etude théorique d'un système de climatisation solaire à déshydratant liquide

III.2. Evaluation du potentiel en énergie solaire de huit sites principaux de Madagascar en vue de la production d'électricité avec des centrales « dish stirling »

III.3. Etude technico-économique de la récupération d'excès de chaleur au niveau d'un centre de cure thermale pour la production d'eau chaude sanitaire d'un Hôtel à Antsirabe

III.4. Analyse de sensibilité paramétrique pour optimiser un système de rafraîchissement solaire à absorption

III.5. Etude expérimentale de la co-digestion anaérobique de quelques déchets organiques à Madagascar

III.6. Etude théorique d'un séchoir-serre à moindre coût pour les produits agricoles

Volet IV : ETUDE THEORIQUE DES ECOULEMENTS DANS UN RESERVOIR PETROLIER : Cas de Tsimiroro Madagascar

Volet V : TRAITEMENTS DES BOUES DES STATIONS D'EPURATION EN VUE DE LEUR VALORISATION ENERGETIQUE

V.1. Séchage thermique des boues des stations d'épuration

V.2. Etude théorique et expérimentale de la méthanisation des boues des stations d'épuration

Volet I : DEVELOPPEMENT D'OUTILS SCIENTIFIQUES

I.1. Un algorithme d'automatisation de l'analyse de sensibilité globale baptisé GoSAT

I.1.1. Genèse de l'idée de développement de cet outil

Lors de mon séjour à l'Université de la Réunion pour débiter mes travaux de thèse en 2000, j'ai pu assister à la soutenance publique de la thèse de Mara [59], un membre de l'équipe de mon laboratoire d'accueil, proposant, entre autres, une méthode d'analyse de sensibilité globale pour servir d'outils d'aide à la validation d'un logiciel de simulation du comportement thermo-aéraulique du bâtiment tel que Codyrun sur lequel il a beaucoup travaillé. Lors de la séance de questions-réponses échangées en pareille circonstance, l'intervention de l'un des membres du jury a particulièrement attiré mon attention car, en tant que géniteur de Codyrun, Boyer [60] a témoigné avoir eu nombreuses altercations avec le doctorant au cours de la réalisation de la thèse. Quelques jours plus tard, ce témoignage a été de nouveau confirmé par les propos du leader de cette équipe Gatina, également mon codirecteur de thèse et coauteur de quatre de mes publications [16-18,20], nous expliquant, nous doctorants débutants à l'époque, combien il est difficile de mener la procédure d'analyse de sensibilité d'un code ou d'un modèle de simulation d'un système physique, dans la mesure où la personne réalisant cette tâche est inmanquablement amenée à titiller de temps en temps le géniteur du code par des questions, des critiques et éventuellement des remises en cause d'un certain nombre de sous-modules du code. Quel que soit le degré d'objectivité que peut avoir ce dernier, il finira par s'agacer vis-à-vis de l'analyseur de la sensibilité paramétrique de son modèle, ne serait ce que pour sa frustration, tout à fait humaine, liée au fait que l'analyseur s'amuse à faire des simulations avec le code de calcul pour ensuite émettre des critiques et recommander des modifications du code, sans avoir vécu les diverses difficultés liées à son développement, et par voie de conséquence, oblige le modélisateur à replonger de temps en temps dans les lignes de programmation de son code qu'il pensait avoir déjà achevé à un moment antérieur.

Cette relation plus ou moins tendue entre le modélisateur de système physique et l'analyseur de sensibilité paramétrique du modèle proposé n'est pas spécifique au cas de Codyrun [60] uniquement. J'ai pu remarquer une situation similaire entre mes deux compagnons malgaches d'aventure doctorale, en l'occurrence Rajaonarivelo [61] et Rakoto-Joseph [62], tels que le premier préparait sa thèse en programmant CodyMa, un code mis au point sur environnement Matlab [63] et analogue à Codyrun (programmé à l'aide de C++) mais destiné notamment à la simulation du comportement thermo-aéraulique des habitats de Madagascar, tandis que le second s'occupait de l'analyse de sensibilité paramétrique de CodyMa. Heureusement, l'esprit de solidarité entre membres d'une équipe de recherche a toujours primé pour les deux cas mentionnés précédemment.

Si l'on compte 3 années pour la réalisation d'une thèse consistant à développer le code simulant le comportement d'un système physique, 3 années pour préparer une autre thèse consistant en la validation expérimentale de ce code et 3 autres années pour son analyse de sensibilité paramétrique globale, l'expérimentateur et l'analyseur de sensibilité paramétriques pourront penser à autres sujets de recherche à l'issue de leurs thèses respectives mais le géniteur du code ou le modélisateur sera contraint de rester pendant 6 à 10 ans sur le même sujet pour surveiller ou accompagner les

modifications de son code à la lumière des résultats expérimentaux et de ceux de l'analyse de sensibilité paramétrique. Il n'y a pas de mal à ce qu'un chercheur reste sur un même sujet durant une décennie si personne ne le dérange de temps en temps pour signaler une remarque voire un bug sous prétexte de parfaire le travail effectué, auquel cas le géniteur du code risque à la longue de réagir sévèrement en interdisant, par exemple, l'usage de son code par d'autres chercheurs. Pour palier cette difficulté, il serait plus pratique de mettre au point un code libre (du type open source) auquel cas on perd toutefois toute paternité du code, laquelle peut être nécessaire pour renforcer la notoriété et l'image de l'équipe en vue de la quête de financements des travaux de recherche.

Généralement, un modélisateur de système physique peut objectivement accepter et collaborer pour qu'on fasse l'analyse de sensibilité paramétrique du code de calcul ou du modèle qu'il propose à la communauté scientifique. En revanche, nous pouvons imaginer qu'il lui serait pénible de devoir patienter 1, 2 voire 3 ans, durée nécessaire à la réalisation d'une autre thèse ou d'un mémoire de Master, après la mise au point du code, pour obtenir un retour de résultats de sensibilité paramétrique globale de ce modèle et ensuite revoir encore ses lignes de commande dans ce code pour y apporter des modifications.

De ce fait, je me suis posé la question sur la possibilité qu'un modélisateur de système physique puisse lui-même effectuer l'analyse de sensibilité paramétrique globale de son propre modèle. En effet, un modélisateur habitué à écrire des programmes de calculs informatiques ne devrait pas trop reculer devant le défi de codage d'un autre programme permettant l'analyse de sensibilité paramétrique de son code de calcul. C'est fort possible à condition d'être préalablement initié à l'analyse de sensibilité paramétrique. Sur ce point, l'opportunité s'est présentée à moi au cours de mon deuxième séjour de préparation de thèse à la Réunion. Un certain après midi de l'hiver austral de l'année 2003, Mara [59] a eu l'amabilité de m'inviter à venir à son bureau au campus du Moufia et de m'accorder environ une heure et demie pour m'initier à sa méthode d'analyse de sensibilité paramétrique. A la sortie de son bureau et sur la route du Littoral pour revenir à mon domicile étudiantin du Tampon, j'étais rempli de courage et d'espoir car je venais d'apercevoir un moyen pour compléter mes travaux de modélisation de systèmes physiques entrant dans le cadre de ma thèse [1] mais j'ignorais à l'époque que j'allais plus tard en faire un cheval de bataille dans mes activités de recherche.

Ainsi, la méthode d'analyse de sensibilité paramétrique globale proposée par Mara [59] a été améliorée pour être appliquée aux modèles de simulation des systèmes physiques, autres que les bâtiments, et la procédure à suivre à cet effet est scrupuleusement spécifiée dans ma thèse [1] où cette méthode, dérivée de la méthode FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test), a été appliquée pour l'analyse de sensibilité globale des modèles de simulation du comportement des systèmes de séchage et de méthanisation des boues des stations d'épuration.

Cependant, le problème initial n'est que partiellement résolu car le modélisateur est encore contraint de bien maîtriser la procédure susmentionnée laquelle nécessite, à un moment donné, l'analyse visuelle des spectres relatifs aux amplitudes de Fourier. Chaque modélisateur aura-t-il suffisamment de courage pour s'atteler à cette tâche en plus du développement de son modèle? Ne fera-t-il pas mieux de laisser cette tâche à un autre chercheur en dépit des inconvénients cités plus haut?

C'est dans le dessein de lever cette ambiguïté qu'a été née l'idée de développer l'algorithme d'automatisation présenté dans la section suivante.

1.1.2. Algorithme d'automatisation de la méthode d'analyse de sensibilité globale des modèles des systèmes complexes

1.1.2.1. Description de la méthode FAST

La méthode suivante est une variante de la méthode FAST proposée par Mara [59]. Elle est, à l'instar de toutes les dérivées de la méthode FAST, basée sur la théorie mathématique de traitement de signal et d'analyse de Fourier. Notons au passage que nous nous contenterons de décrire, à notre niveau de connaissance en la matière et de manière succincte, la base de la démarche de cette méthode sans entrer dans les détails mathématiques de cette dernière [1].

Considérons un modèle à p facteurs $\{x_1, x_2, \dots, x_h, \dots, x_p\}$ et dont une des sorties notée y s'écrit :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_h, \dots, x_p) \quad (1)$$

Chaque facteur x_h possède une plage de variation P_h définie préalablement, telle que

$$P_h = [L_h, U_h] \quad (2)$$

avec $L_h \leq x_h \leq U_h$ et $h = 1$ à p

Désignons par $\{x_1^0, x_2^0, \dots, x_h^0, \dots, x_p^0\}$ les valeurs nominales (ou valeurs de base) respectives des p facteurs du modèle. La réponse de ce modèle par rapport à ces valeurs nominales s'écrit :

$$y_0 = f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_h^0, \dots, x_p^0) \quad (3)$$

Par la suite, nous utiliserons le terme "réponse nominale" pour désigner y_0 .

Pour chaque facteur x_h ($h = 1$ à p), définissons un intervalle restreint I_h^* de largeur $2\delta_h$ centré sur sa valeur nominale x_h^0 et inclus dans sa plage de variation P_h ; c'est-à-dire :

$$I_h^* = [x_h^0 - \delta_h, x_h^0 + \delta_h] \quad (4)$$

avec $L_h + x_h^0 < \delta_h < U_h - x_h^0$ et $h = 1$ à p

En exécutant, avec ce modèle un nombre N_s de simulations, tels que tous les facteurs x_h ($h = 1$ à p) oscillent simultanément de manière discrète dans leurs intervalles restreints respectifs de variation I_h^* , la sortie y^* du modèle aura autant de valeurs. Compte tenu de la définition susmentionnée de ces intervalles restreints I_h^* , il est légitime de prendre y_0 comme référence des N_s valeurs de la réponse y^* . Ainsi, nous avons :

$$y^* = f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_h^*, \dots, x_p^*) \quad (5)$$

qui peut s'écrire encore

$$y^* = y_0 + g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_h^*, \dots, x_p^*) \quad (6)$$

dans lesquelles,

x_h^* : valeurs prises par le facteur x_h oscillant dans son intervalle restreint I_h^* ($h = 1$ à p)

g : modèle virtuel à p facteurs générant l'écart entre y_0 et chaque valeur de y^*

Si la demi-largeur δ_h de l'intervalle restreint I_h^* de variation de chaque facteur x_h est suffisamment petit par rapport à sa plage totale de variation P_h , il est plausible que les N_s valeurs de la sortie y^* s'écartent de peu de y_0 . Autrement dit, les N_s valeurs de la sortie ($y^* - y_0$) du modèle virtuel g sont presque de petites valeurs. Tout se passe alors comme si la vibration de chaque facteur x_h autour de sa valeur nominale engendre, à la sortie du modèle f , un bruit sur la réponse nominale y_0 de celui-ci.

Aussi, en marge des définitions soutenues dans la littérature, pouvons-nous également avancer que l'analyse de sensibilité du modèle f considéré consiste en l'évaluation de l'effet de bruitage généré par chacun de ses p facteurs pour corrompre sa réponse nominale y_0 lorsque ceux-ci vibrent simultanément dans leurs intervalles restreints respectifs de variation.

Il est donc de mise de savoir lesquels de ces facteurs occasionnent le plus de bruit au niveau de cette sortie nominale y_0 . Cela revient à discerner parmi ces facteurs, ceux qui, soit par leur action individuelle soit par leur action avec les autres, sont susceptibles de maximiser la valeur absolue de la sortie du modèle virtuel g et ceux qui ne le sont pas.

Nous avons employé le terme "virtuel" pour qualifier le modèle g du fait que, contrairement au cas du modèle f original, on ignore a priori sa forme et son mécanisme; c'est-à-dire que g est une boîte noire.

Ainsi, notre démarche pour l'analyse de sensibilité du modèle f commence par approcher le modèle virtuel g en un modèle de forme polynomiale à plusieurs variables. En effet, la forme polynomiale permet d'obtenir sans équivoque l'information sur l'importance de l'effet d'un facteur donné sur la sortie observée. Cette démarche s'oriente subséquentement à l'analyse de régression du métamodèle (ou surface de réponse) ainsi obtenu.

Sachant que la sortie de g caractérise des bruits, il est commode de transformer ses entrées en variables standardisées, c'est-à-dire, comprise entre $[-1, +1]$. De plus, une fois que les variables sont standardisées, nous pouvons aisément comparer les coefficients de régression du métamodèle qui renseigne sur l'importance d'un facteur quelconque associé à l'une de ces variables. La standardisation s'opère à l'aide du changement de variable ci-après:

$$\langle x_h \rangle = \sin \left[\arcsin \frac{(x_h^* - x_h^0)}{\delta_h} \right] \quad \text{avec} \quad h = 1 \text{ à } p \quad (7)$$

Dans notre étude, nous avons introduit un coefficient de proportionnalité α_p [%] entre la demi-largeur δ_h de l'intervalle restreint I_h^* et la largeur de la plage totale P_h de variation du facteur x_h tel que

$$\delta_h = \frac{\alpha_p (U_h - L_h)}{100} \quad \text{avec} \quad h = 1 \text{ à } p \quad (8)$$

En conséquence, le métamodèle ou surface de réponse du modèle f peut s'écrire comme suit:

$$\begin{aligned}
y^* = & y_0 + \sum_{h=1}^p \beta_h \langle x_h \rangle + \sum_{h=1}^p \sum_{\substack{h'=1 \\ h' \leq h}}^p \beta_{hh'} \langle x_h \rangle \langle x_{h'} \rangle \\
& + \sum_{h=1}^p \sum_{\substack{h'=1 \\ h' \leq h}}^p \sum_{\substack{h''=1 \\ h'' \leq h'}}^p \beta_{hh'h''} \langle x_h \rangle \langle x_{h'} \rangle \langle x_{h''} \rangle + \dots
\end{aligned} \quad (9)$$

Les coefficients de régression du 1^{er} ordre β_h , du 2^{eme} ordre $\beta_{hh'}$, et du 3^{eme} ordre $\beta_{hh'h''}$ (ainsi que ceux du 4^{eme} ordre, 5^{eme} ordre, etc.) sont déterminés à l'aide d'un algorithme de régression non-linéaire. Cependant, il convient de se limiter généralement au 3^{eme} ordre pour les deux raisons ci-après: premièrement, les contraintes de capacité informatique ne permettent pas de déterminer un nombre trop élevé de coefficients; et deuxièmement, les termes polynomiaux supérieurs à l'ordre 3 sont généralement insignifiants du fait que les variables standardisées $\langle x_h \rangle$ sont comprises entre [-1, +1].

Par ailleurs, les termes restants peuvent encore être affinés en négligeant également les termes n'ayant aucune influence significative sur la sortie observée de ce modèle. Il s'impose alors de trouver une méthode permettant d'identifier les termes non négligeables qui constituent conséquemment la forme définitive du métamodèle. C'est dans ce cadre qu'interviennent la méthode baptisée FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) et ses dérivées.

En effet, la méthode FAST, qui a été développée pour la première fois par Cukier *et al.* [64], consiste dans un premier temps à paramétrer l'échantillonnage des différents facteurs à l'aide d'une variable commune s , de sorte que chacun d'eux décrive une fonction périodique G_h caractérisée par une fréquence w_h ; le choix de la fonction périodique étant fait afin d'assurer une bonne couverture de l'espace des facteurs. Ainsi, l'évolution du facteur x_h^* peut s'exprimer de la manière suivante:

$$x_h^* = G_h(\sin(w_h s)) \quad (10)$$

Pour l'application de FAST à l'analyse de régression, il est d'usage de faire évoluer les facteurs, d'une simulation à une autre, suivant une sinusoïde dans leurs intervalles restreints respectifs de variation, telle que

$$G_h(x) = x_h^0 + \delta_h x \quad (11)$$

Ainsi, nous avons:

$$x_h^{*k} = x_h^0 + \delta_h \sin(w_h s^k) \quad \text{avec } s^k = \frac{2\pi k}{N_s} \quad (12)$$

où k désigne le numéro de simulation ($k = 1$ à N_s) et w_h est la fréquence associée au facteur x_h ($h = 1$ à p).

A partir de la relation de standardisation (7) et de l'équation (10), nous pouvons écrire :

$$\langle x_h \rangle = \sin(w_h s) \quad (13)$$

En injectant les expressions respectives de $\langle x_h \rangle$, $\langle x_{h'} \rangle$, $\langle x_{h''} \rangle$ dans le métamodèle (9), nous obtenons :

$$\begin{aligned}
y^* = y_0 + \sum_{h=1}^p \beta_h \cdot \sin(w_h s) + \sum_{h=1}^p \sum_{\substack{h'=1 \\ h' \leq h}}^p \frac{\beta_{hh'}}{2} [-\cos((w_h + w_{h'})s) + \cos((w_h - w_{h'})s)] + \\
\sum_{h=1}^p \sum_{\substack{h'=1 \\ h' \leq h}}^p \sum_{\substack{h''=1 \\ h'' \leq h'}}^p \frac{\beta_{hh'h''}}{4} \left[\begin{array}{l} -\sin((w_h + w_{h'} + w_{h''})s) + \sin((w_h + w_{h'} - w_{h''})s) + \\ \sin((w_h - w_{h'} + w_{h''})s) + \sin((-w_h + w_{h'} + w_{h''})s) \end{array} \right]
\end{aligned} \tag{14}$$

Le métamodèle est donc une somme des fonctions trigonométriques décomposables chacune en série de Fourier. Eu égard à la forme de cette équation et en vertu du théorème mathématique stipulant que :

- les coefficients de Fourier de la somme de deux fonctions données sont la somme de leurs coefficients de Fourier respectifs ;
- les coefficients de Fourier produit d'un scalaire avec une fonction donnée sont le produit de ce scalaire aux coefficients de Fourier de cette fonction.

Nous pouvons déduire que les coefficients de régression du métamodèle sont proportionnels aux coefficients de Fourier.

Il s'en suit que plus le coefficient de Fourier relatif à une fréquence originale donnée est élevé, plus important est l'effet de corruption causé par le facteur associé à cette fréquence sur la réponse nominale du modèle analysé. Ainsi, l'identification de la forme définitive du métamodèle se réalise par comparaison des coefficients de Fourier relatifs à la sortie.

En faisant usage de l'algorithme récursif, connu sous l'acronyme FFT (Fast Fourier Transform) et développé par Cooley et Tukey [65], pour calculer les coefficients de Fourier relatifs aux N_s valeurs de la réponse y^* du modèle étudié, il nous est possible de produire la représentation spectrale de cette dernière afin d'y déceler ensuite toutes les fréquences (fondamentales ou engendrées) caractérisées par des pics dominants sur l'étendue du spectre. Ainsi s'obtiennent les termes significatifs constituant la forme finale du métamodèle dont les coefficients de régression peuvent, par la suite, être déterminés à l'aide d'un algorithme spécifique à cet effet.

1.1.2.2. Procédé d'automatisation de la méthode FAST sur environnement Matlab

Dans le dessein de comparer les effets linéaires et les effets d'interactions des paramètres et de générer automatiquement la surface de réponse ou le métamodèle relatant la relation facteur/sortie d'un modèle donné, les étapes à suivre du procédé d'automatisation de la méthode FAST se déclinent de la manière suivante :

- 1) Attribuer les fréquences w_h aux facteurs x_h ($h = 1$ à p).
- 2) Donner les valeurs nominales x_h^0 ($h = 1$ à p) des facteurs, la gamme de variation R_h de chaque facteur, le coefficient de proportionnalité α_p ($0 < \alpha_p < 100$) et un nombre N_t qui limite le nombre de fréquence détecté par représentation spectrale.
- 3) Faire une simulation pour obtenir la valeur de la réponse nominale y_0 du modèle étudié, en utilisant les valeurs nominales x_h^0 de l'étape 2).

- 4) Donner le nombre N_s de simulations nécessaires tout en respectant le théorème de Shannon tel que $N_s \geq 2 * \text{MAX}(w_h) |_{h=1 \text{ à } p}$.
- 5) Evaluer la demi-longueur δ_h de l'intervalle restreint I_h^* de chaque facteur x_h (équation (8)).
- 6) Réaliser les N_s simulations y^* avec le modèle de sorte que chaque facteur décrive d'une simulation à l'autre une fonction sinusoïdale autour de sa valeur nominale (équations (5) et (12)).

D'où, pour N_s simulations on a :

$$y_k^* = f(x_1^{*k}, x_2^{*k}, \dots, x_h^{*k}, \dots, x_p^{*k}) \quad (15)$$

$$\text{avec } x_h^{*k} = x_h^0 + \delta_h \sin(w_h s_k) \quad (16)$$

$$\text{et } s_k = \frac{2\pi k}{N_s} \quad (17)$$

où $k = 0$ à N_s

- 7) Initialiser comme vide les éléments suivants:
 - a. Un vecteur H_q qui stocke les numérotations des facteurs les plus influents associés aux fréquences fondamentales.
 - b. Une matrice à 2 colonnes H_m qui stocke les numérotations des doublets de facteur les plus influents associés aux interactions d'ordre 1 entre deux facteurs.
 - c. Une matrice à 3 colonnes H_n qui stocke les numérotations des triplets de facteur les plus influents associés aux interactions d'ordre 2 entre trois facteurs.
- 8) Initialiser le métamodèle \tilde{y} tel que: $\tilde{y}_k = y_0$ où $k = 0$ à N_s ;
- 9) Calculer le "model virtuel" g qui génère la différence entre chaque valeur de \tilde{y} et chaque valeur de y^* :

$$g_k = y_k^* - \tilde{y}_k \quad (18)$$

avec $k = 0$ à N_s

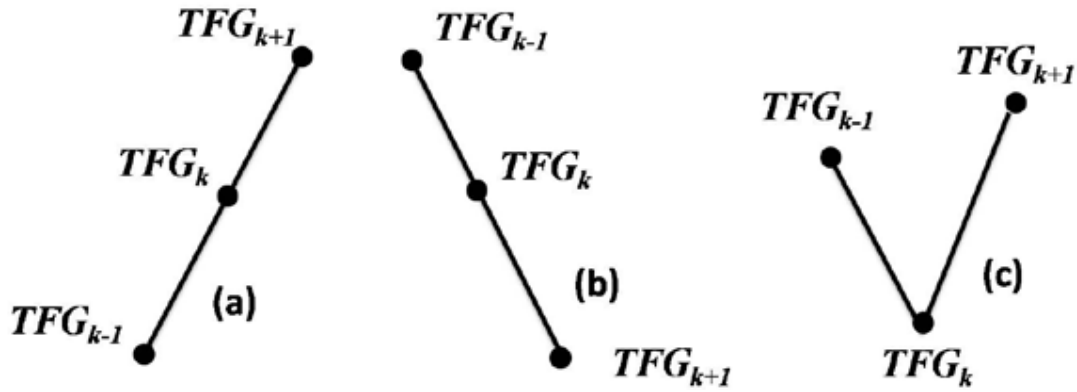
- 10) A l'aide de l'algorithme récursif FFT (Fast Fourier Transform), développé par Cooley et Tukey [65], calculer les coefficients de Fourier relatifs aux N_s valeurs du modèle virtuel g . En effet, les amplitudes de Fourier associées aux fréquences fondamentales ou engendrées sont proportionnelles aux coefficients de régression du métamodèle.

Ainsi, on a à évaluer l'expression TFG suivante:

$$TFG = \frac{|\text{FFT}(g)|}{N_s} \quad (19)$$

- 11) Parmi les N_s valeurs de TFG , annuler ceux ne constituant pas un pic; c'est-à-dire les points TFG_k ($k = 0$ à N_s) tels que :

- $TFG_{k-1} < TFG_k < TFG_{k+1}$ (Figure I.1. (a))
- $TFG_{k+1} < TFG_k < TFG_{k-1}$ (Figure I.1. (b))
- $TFG_k < TFG_{k-1}$ et $TFG_k < TFG_{k+1}$ (Figure I.1. (c))

Fig. 1.1.: Eléments à annuler du vecteur TFG

- 12) Les spectres étant symétriques, les $E(N_s/2)$ simulations suffisent pour mener l'étude de sensibilité (E désignant la fonction partie entière d'un nombre réel).
- 13) Seules les fréquences associées aux N_t (ou inférieur à N_t) plus grandes valeurs de TFG seront considérées pour chaque représentation spectrale.
- 14) Soit h ($h = 1, 2, \dots, p$) les numérotations des facteurs du modèle. Parmi les fréquences considérées, trouver celles qui éventuellement sont égales aux:
- Fréquences fondamentales w_h ($h = 1, 2, \dots, p$) données à l'étape (1), et ajouter aux éléments du vecteur H_q (initialisé à l'étape 7.a) les numérotations h des facteurs associés aux fréquences ainsi détectées.
 - Fréquences induites d'ordre 2 : $(w_{h'} + w_{h''})$ et $|w_{h'} - w_{h''}|$; et ajouter à la prochaine ligne du vecteur H_m (initialisé à l'étape 7.b) le doublet de numérotation (h', h'') des facteurs associés aux fréquences détectées.
 - Fréquences induites d'ordre 3 ; les quatre fréquences suivantes devront être détectées à la fois : $(w_{h'''} + w_{h^{iv}} + w_{h^v})$, $|w_{h'''} - w_{h^{iv}} + w_{h^v}|$, $|w_{h'''} + w_{h^{iv}} - w_{h^v}|$, $|w_{h'''} - w_{h^{iv}} - w_{h^v}|$, et ajouter à la prochaine ligne du vecteur H_n (initialisé à l'étape 7.c) le triplet de numérotation (h''', h^{iv}, h^{iv}) des facteurs associés aux fréquences détectées.
- 15) En minimisant $(y^* - \tilde{y})$ avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt [66], déterminer les coefficients de régression α, β, γ tels que l'expression du métamodèle \tilde{y} s'écrit:

$$\tilde{y}_k = y_0 + \sum_{i=1}^{N_{H_q}} \alpha_i \langle x(H_q(i)) \rangle_k + \sum_{i=1}^{N_{H_m}} \beta_i \langle x(H_m(i, 1)) \rangle_k \langle x(H_m(i, 2)) \rangle_k + \sum_{i=1}^{N_{H_n}} \gamma_i \langle x(H_n(i, 1)) \rangle_k \langle x(H_n(i, 2)) \rangle_k \langle x(H_n(i, 2)) \rangle_k \quad (20)$$

avec

$$\langle x(H_q(i)) \rangle_k = \sin(w(H_q(i)) * s_k) \quad (21)$$

$$\langle x(H_m(i, 1)) \rangle_k = \sin(w(H_m(i, 1)) * s_k) \quad (22)$$

$$\langle x(H_m(i, 2)) \rangle_k = \sin(w(H_m(i, 2)) * s_k) \quad (23)$$

$$\langle x(H_n(i, 1)) \rangle_k = \sin(w(H_n(i, 1)) * s_k) \quad (24)$$

$$\langle x(H_n(i, 2)) \rangle_k = \sin(w(H_n(i, 2)) * s_k) \quad (25)$$

$$\langle x(H_n(i, 3)) \rangle_k = \sin(w(H_n(i, 3)) * s_k) \quad (26)$$

$$s_k = \frac{2\pi k}{N_s}, \quad (k = 0 \text{ à } N_s) \quad (27)$$

dans lesquelles,

N_{H_q} : Nombre d'élément du vecteur H_q

N_{H_m} : Nombre de ligne de la matrice H_m

N_{H_n} : Nombre de ligne de la matrice H_n

$w(H_q(i))$: Fréquence associée au facteur N° $H_q(i)$

$w(H_m(i, 1))$: Fréquence associée au facteur N° $H_m(i, 1)$

$w(H_m(i, 2))$: Fréquence associée au facteur N° $H_m(i, 2)$

$w(H_n(i, 1))$: Fréquence associée au facteur N° $H_n(i, 1)$

$w(H_n(i, 2))$: Fréquence associée au facteur N° $H_n(i, 2)$

$w(H_n(i, 3))$: Fréquence associée au facteur factor N° $H_n(i, 3)$

A noter que sur Matlab, les fonctions « lsqnonlin.m » et « curvfit.m » peuvent être utilisées pour calculer les coefficients de régression.

- 16) Tracer les spectres et montrer sur la représentation spectrale les fréquences détectées à l'étape (14) en utilisant les propriétés de la fonction « annotation » de Matlab.
- 17) Calculer la nouvelle valeur de la fonction virtuelle g comme défini à l'étape (9)
- 18) L'arrêt de l'opération est décidé lorsque :
 - Les amplitudes de Fourier restantes sont inférieures à une tolérance ε donnée
 - Aucune fréquence n'est détectée à l'étape (14)
 - Les fréquences détectées lors de l'itération précédente sont encore repérées à la prochaine itération.

Autrement, reprendre les calculs à partir de l'étape (10)

- 19) Ecrire l'expression finale du métamodèle \tilde{y} .
- 20) Valider l'expression du métamodèle en comparant la réponse originale y^* et la réponse issue du métamodèle \tilde{y} . Graphiquement, l'obtention d'un nuage fin de points longeant la bissectrice des axes (y^*, \tilde{y}) prouve la bonne précision du métamodèle. Statistiquement, une valeur du coefficient de détermination R^2 proche de l'unité permet également de valider le métamodèle.
- 21) En utilisant des histogrammes, illustrer une comparaison graphique :
 - des valeurs de α_i ;
 - des valeurs de β_i .

Les références [2, 27] donnent plus de détails sur cet algorithme d'automatisation de la méthode FAST.

1.1.3. Performance de GoSAT

Il convient de noter dans un premier temps que l'appellation GoSAT est l'acronyme de « Global Sensitivity Analysis Tool » signifiant littéralement « Outil d'analyse de sensibilité globale ».

Une fonction analytique due à Sobol [67, 68] a été utilisée pour tester la bonne performance de cet outil. En effet, cette fonction est communément utilisée comme fonction de teste des algorithmes d'analyse de sensibilité globale du fait de sa complexité ; c'est-à-dire, cette fonction est fortement non-linéaire et non-monotone et tous ses termes d'interactions sont par définition non nuls. Ainsi, les résultats obtenus à l'issue de ce teste concordent bien à ceux attendus et mettent conséquemment en exergue la bonne performance de GoSAT [2].



Avec cet outil, les modélisateurs n'auront plus à attendre l'achèvement des travaux d'autres chercheurs pour avoir un feedback sur les arguments d'entrée et les facteurs de leurs propres modèles, mais peuvent directement effectuer une analyse de sensibilité globale juste après l'élaboration des codes de calcul liés à ces modèles.

Aussi, GoSAT a été utilisé avec succès pour effectuer l'analyse de sensibilité globale des modèles de simulation d'un certain nombre de systèmes physiques complexes dont la climatisation solaire utilisant un déshydratant liquide [6] et l'habitat doté d'un toit vert [4, 5].

1.2. Outil de description et de modélisation systémique du fonctionnement énergétique des espaces bâtis

Cette étude a pour but de proposer un outil de simulation de la consommation énergétique d'un espace bâti quelconque. Nous entendons par « espace bâti » toute construction artificielle associée à l'activité humaine. Les systèmes observés concernent les différents secteurs d'activité d'un territoire donné : le secteur habitat ainsi que l'ensemble des secteurs économiques associés aux milieux agricoles (secteur Primaire), aux milieux industriels (secteur Secondaire) et aux activités de services (secteur Tertiaire). Les descriptions et analyses porteront sur plusieurs échelles d'investigation, d'une approche globale à une approche de plus en plus détaillée. Il s'agira d'identifier et de caractériser en amont des espaces bâtis l'ensemble des systèmes aménagés dans lesquels s'intègrent les espaces bâtis dans des approches typologiques adaptées. La même démarche sera conduite en aval de l'espace bâtis en relation avec les bâtiments composant ces différentes entités, les espaces de consommations énergétiques au sein des bâtiments, les postes de consommations et les appareils qui leur sont associées. La description conduite fait appel aux préceptes et concepts de l'approche systémique (Fig. 1.2).



Fig. 1.2. Description systémique des espaces bâtis

Cet outil de simulation permettra ainsi de décrire les courbes de consommation énergétique de chaque poste et espace de consommation. Il permettra également d'établir la signature énergétique

des espaces bâtis à plusieurs échelles d'observation, par exemple, pour une étude appliquée à un habitat individuel, le calcul sera fait à l'échelle du bâtiment, de la propriété, du quartier ou de l'agglomération. Plusieurs applications et développements peuvent donc découler de cet outil d'analyse du fonctionnement énergétique des systèmes de consommation énergétique conçu dans sa configuration recherche et développement sous environnement EXCEL ou MATLAB. La référence [18] détaille l'approche utilisée et donne un exemple de résultats obtenu avec cet outil. Comme exemples d'utilisation de cette approche, nous pouvons citer les travaux de Hatik [58] sur la gestion raisonnée des déchets en vue de leur valorisation énergétique en milieu insulaire et de Nidhoimi *et al.* [98] sur l'étude du fonctionnement énergétique d'un espace bâti et de son bilan carbone associé.

Volet II : EFFICACITE ENERGETIQUE DES BATIMENTS

II.1. Bref état des lieux de l'habitat à Madagascar

Notons que le présent état des lieux se limite à décrire brièvement les différents types d'habitats existant à Madagascar en précisant notamment les matériaux de construction utilisés pour les divers composants des bâtiments. En effet, le confort thermique d'un habitat peut rationnellement être obtenu en améliorant l'apport de chacun des composants son enveloppe à cet effet. Un état des lieux beaucoup plus détaillé est donné dans la thèse de Razanamanampisoa [69] avec qui j'ai eu le plaisir de collaborer pour le travail rapporté dans la section II.2.

Hormis les us et coutumes ancestraux d'une quelconque localité, ses conditions climatiques et le pouvoir d'achat de sa population ainsi que l'urbanisme influent sur l'architecture et les types de matériaux de construction de ses habitats. Traversé par le Tropique de Capricorne, Madagascar est situé dans la zone tropicale humide de l'Océan Indien. Cependant, étant classée la quatrième plus grande île du monde avec une superficie totale de 587 041 km², le climat n'y est pas du type tropical humide partout mais de nombreux microclimats règnent dans ses différentes régions. En effet, nous pouvons distinguer deux types de saisons à Madagascar, à savoir : la saison humide (de mi-octobre à mi-avril) et la saison sèche (de mi-avril à mi-octobre). Généralement, les conditions météorologiques tropicales prédominent dans les zones côtières de l'île tandis qu'à l'exception de la région aride semi-désertique du sud de l'île, le climat est plus tempéré, c'est-à-dire, frais (en saison sèche) et pluvieux (en saison humide) dans les Hautes Terres centrales comme la région d'Analamanga où se situe la ville d'Antananarivo. Il convient aussi de noter que les mouvements sismiques susceptibles d'occasionner de sérieux dommages des bâtis se manifestent très rarement dans la « Grande Île ».

Historiquement, à Antananarivo, du temps où « l'île rouge » était encore appelée « l'île verte », les maisons étaient principalement construites avec du bois et les édifices en dur ont même été interdits par un édit royal ancestral d'Andrianampoinimerina (1787-1810) jusqu'à ce que la reine Ranaivalona II (1868-1883) le lève en 1868. En effet, les bois de construction s'étant faits de plus en plus rares, les édifices en bois devenaient uniquement le privilège des souverains et aristocrates.

Malgré les influences architecturales étrangères occasionnées par les 70 années de colonisation française et par le progrès technologique actuel pour la diffusion de l'information technique et du savoir-faire, force est de constater qu'après un siècle et demi du levé de l'édit royal susmentionné, les techniques de construction n'ont pas beaucoup évolué notamment dans les milieux ruraux malgaches où vivent 78% de la population.

En effet, les murs des maisons rurales des Hautes Terres de l'île sont encore en pisé (du moins pour les fondations) ou en brique de terre crue et sont couverts d'enduits obtenus en mélangeant le sable, la latérite, la bouse des zébus et l'eau. Dans les provinces d'Antananarivo et de Fianarantsoa, les maisons rurales comportent généralement un étage et des pignons. En revanche, dans les régions côtières, les habitats ruraux sont souvent sans étage et les murs sont en bois, en tôles ou en d'autres tiges de végétations abondantes dans les savanes environnantes telles que le ravenala, le bambou et le palmier bleu (ce dernier étant endémique de Madagascar, connu sous le nom scientifique « *bismarckia nobilis* » mais localement appelé « satrana » et réputé pour être très résistant au feu).

Les toits de chaume sont les plus répandus dans les villages ruraux malgaches. Cependant, il n'est pas rare de voir des toitures faites en tôles ondulées ou en tuiles, notamment dans les villages périphériques des agglomérations. Sur les hauts plateaux, le dallage des maisons rurales est fait simplement de la terre battue couverte de nattes tandis que le plancher de l'étage est fait soit de parquets de planches de bois massif soit d'une couche horizontale de pisé comportant une ossature de petits bambous (2 à 3 centimètres de diamètre) disposés cote à cote et supportés par des solives en rondins de bois d'eucalyptus (environ 10 centimètres de diamètres). Par contre, dans les zones forestières et les zones côtières sableuses, les habitats sont souvent montés sur pilotis ; de ce fait, le plancher est usuellement constitué par des parquets de planches de bois massif. Les plafonds des habitats ruraux sont faits soit des isorels et contreplaqués, soit des écorces, feuilles et tiges, soit des lames de bambous écrasés couvertes de torchis. Il est à noter toutefois que plusieurs maisons rurales sont dépourvues de ce composant considéré comme un luxe. En termes d'ouvertures, les maisons rurales des Hautes Terres sont généralement orientées vers l'Ouest, c'est-à-dire, la proportion maximale d'ouvertures, dont la porte principale, est pratiquée sur la façade Ouest. En effet, les paysans quittent leurs habitats très tôt le matin pour aller aux champs et ne rentrent que vers 15h de l'après midi ; c'est à cette occasion qu'ils ont la possibilité d'ouvrir librement les différentes ouvertures de leurs demeures pour recevoir la radiation solaire de l'Ouest afin d'acquérir une certaine inertie thermique nécessaire au confort thermique en période nocturne au sein de ces demeures. De plus, il est de coutume ancestral de ne mettre aucune ouverture sur la façade sud de la maison, les ouvertures sur la façade Est sont limitées à des petites fenêtres afin de protéger l'intérieur de l'habitat du vent froid en provenance du Sud et de l'Est. Du point de vue équipement sanitaire, les latrines sont les plus couramment utilisées en milieux ruraux malgaches. En outre, la défécation en plein air ou dans la mer est également une pratique courante dans certaines localités.

Dans les zones urbaines et suburbaines de Madagascar, les ouvrages en béton sont très courants du moins pour les fondations, les colonnes et les chainages. Les murs sont édifiés à l'aide des briques cuites ou des parpaings couverts d'enduits cimentés. Le vitrage des ouvertures devient également une pratique courante dans l'architecture urbaine. Les planchers du rez-de-chaussée sont généralement faits, soit de dalle en béton revêtue de carrelage ou simplement d'une couche lissée d'enduit cimenté, soit de parquets de planches longues de bois d'eucalyptus posées côte à côte et clouées directement sur les lambourdes ; les petits parquets disposés en structure mosaïque de bois précieux, comme le palissandre, étant encore le privilège des ménages aisés. Par ailleurs, les planchers des étages sont constitués soit de hourdis soit de béton armé soit de parquets de planches longues d'eucalyptus. Il convient de noter que ce dernier cas convient bien les innombrables édifices à étage devant être construits rapidement pour raison d'inexistence de permis de construire. En ce qui concerne la toiture, les tôles ondulées ou galvanisées sont les plus utilisées pour couvrir les maisons et villas individuelles lesquelles constituent plus de 80% des habitats urbains malgaches. Les autres types de matériaux pour la toiture sont la tuile d'argile cuite et le béton (pour les bâtiments administratifs notamment). Les matériaux utilisés pour le plafond varient en fonction de ceux utilisés pour le plancher de l'étage se trouvant juste au dessus de la pièce considérée mais les matériaux les plus couramment employés sont : les isorels et contreplaqués, l'enduit cimenté (sur béton ou hourdis ou lattis métalliques), le plaque-au-plâtre et le volige. Dans les villes, les maisons sont surtout orientées par rapport aux rues qui les bordent éventuellement ; autrement, elles sont orientées vers l'Ouest comme à la campagne mais les ouvertures sur toutes les façades sont pratiquées du fait que les habitats sont bâtis cote à cote et se font écrans les uns des autres vis-à-vis des directions du

rayonnement solaire et du vent. Par ailleurs, les bâtiments modernes étant généralement dotés de fosses sceptiques, plusieurs maisons urbaines ne sont toutefois pas raccordées au réseau d'approvisionnement en eaux potables, et en conséquence, sont uniquement pourvues de latrines.

Il découle de ce qui précède que :

- les principales raisons du choix des types de matériaux de construction utilisés en zones rurales sont leurs faibles coûts, leur abondance dans les milieux environnants ainsi que le caractère bioclimatique procurant du confort thermique aux occupants des bâtis ;
- les types d'habitats rencontrés dans les zones côtières sont très vulnérables aux dépressions tropicales à tel point qu'il y a en moyenne annuelle deux localités déclarées comme étant ravagées à hauteur d'au moins 70% durant chaque saison humide ;
- beaucoup de travaux de recherche sont encore à faire pour trouver un compromis entre la solidité des bâtis en milieux ruraux des zones côtières vis-à-vis des dépressions tropicales, leurs caractères semi-bioclimatiques et leurs coûts ainsi que la disponibilité des matériaux de construction.
- la majorité de la population malgache vivent dans des habitations nécessitant des améliorations techniques, voire des innovations, portant notamment sur le mode d'assainissement de base et sur la maîtrise de l'énergie en vue du confort thermique de l'habitat.

Etant donné qu'améliorer les bâtiments existants en vue du confort thermique en leurs seins reviendrait à démolir la plupart d'entre eux et que la mise en œuvre des projets relatifs aux logements sociaux est encore en nombre insuffisant par rapport à la croissance démographique du pays, la contribution de notre équipe de recherche sur la sous-thématique du confort thermique des habitats, se focalise surtout sur les futures constructions plutôt que sur les existants. Ainsi, les travaux rapportés dans le présent document sur cette sous-thématique se subdivisent en deux catégories telles qu'en vue d'efficacité énergétique des bâtiments, la première concerne un travail ayant pour but de proposer des solutions techniques passives simples à un coût acceptable de construction de bâtiment, tandis que la deuxième regroupe les travaux portant sur l'étude de la performance énergétique des toits verts. Il convient de noter que les travaux portant sur les systèmes auxiliaires comme les systèmes de climatisation solaire ou encore de production d'eau chaude sanitaire, bien que ces systèmes visent le confort dans l'habitat, sont plutôt rapportés au Volet III.

II.2. Proposition de solutions passives en utilisant des matériaux disponibles localement

Il convient de noter dans un premier temps que l'étude rapportée dans la présente section concerne les Hautes Terres malgaches où l'inconfort thermique dans les bâtiments se produit principalement pendant l'hiver [14,69], c'est-à-dire, durant la période sèche.

A titre d'exemple, la figure II.1. présentant les degrés-jours de chauffage et de rafraîchissement (Heating and Cooling Degree Days) requis au niveau de la ville d'Antananarivo pour l'année 2007, montre que la consommation d'énergie nécessaire au chauffage du bâtiment est largement supérieure à celle liée à la climatisation [5].

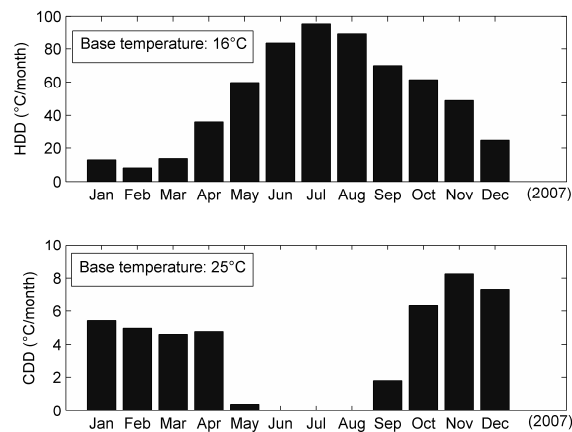


Fig. II.1. Degrés-jours de chauffage (HDD) et de rafraîchissement (CDD) pour de la ville d'Antananarivo en 2007

Ainsi, notre équipe voudrait proposer des solutions techniques simples passives en utilisant des matériaux locaux et à un faible coût dans le cas de la région d'Antananarivo, qui est situé dans un climat d'altitude tempéré. Pour ce faire, la méthodologie adoptée est résumée de la manière suivante :

- Choix d'un fichier météorologique type de la région d'Antananarivo;
- Choix de l'habitat type pouvant représenter ce qui est aujourd'hui construit en projet pilote;
- Simulations du comportement thermo-aéraulique de l'habitat type, à l'aide du code de calcul Codyrun [60], en faisant varier les valeurs des paramètres thermo-physiques des composants de son enveloppe et en utilisant le fichier météorologique type susmentionné: la comparaison de la performance des différentes solutions techniques a été faite en examinant la température résultante au niveau de chaque pièce considérée ; en effet, cette variable permet de prendre en compte l'inconfort dû aux rayonnements de grande longueur d'ondes [60] ;
- Exploitation et analyse des résultats par zone : en marge du suivi de l'évolution dynamique de la température résultante durant la séquence hivernale type, ses moyennes diurne (de 07:00 h à 18:00 h) et nocturne (de 19:00 h à 06:00 h) ont également été observées pour caractériser l'utilisation de la salle de séjour et des deux chambres respectivement.

L'habitat type a été choisi pour être la plus représentative possible des types des maisons construites à Antananarivo, en termes d'architecture et de nombre de chambres. Comme nous pouvons distinguer sur son plan présenté par la figure II.2., il est constitué de deux chambres, une salle de séjour, une toilette, une douche et une salle de cuisine. Les matériaux de son enveloppe sont caractérisés comme suit : des murs en brique de terre crue, des portes en bois de pin avec vitrage, une toiture en tuile dotée d'un plafond en plâtre.

A l'issue de ces simulations, les solutions techniques proposées concernent les matériaux supplémentaires à utiliser pour l'isolation de l'enveloppe du bâtiment considéré. Plus précisément, il est recommandé d'employer la paille pour l'isolation du toit et les torchis pour l'isolation interne et externe des parois. De plus, il découle également de cette investigation que le confort est

complètement atteint aussi bien en période diurne qu'en période nocturne avec les solutions passives simples ci-après : une orientation de l'habitat vers le Sud, une épaisseur de 15 cm des couches respectives de paille et de torchis, une surface de vitrage occupant 30% de chacune des façades Nord et Est; 10% de celle du Sud; 20% de celle de l'Ouest.

La méthodologie utilisée, les résultats et discussion sont plus détaillés dans [14,69].

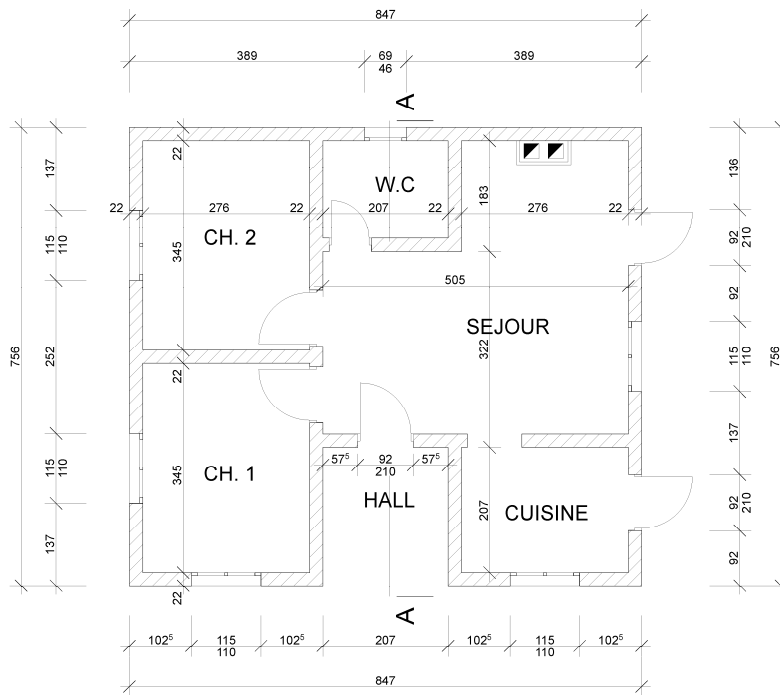


Fig. II.2. Plan de l'habitat type choisi

II.3. Etude de la performance énergétique des toits verts

Les travaux réalisés sous ma direction scientifique pour étudier la performance énergétique des toits verts, ont résulté les présentations de quatre mémoires de DEA de l'Université d'Antananarivo [26-28, 32] et d'un mémoire de Master de l'Université de la Réunion [40] ainsi que la publication de trois articles scientifiques dans des revues à audience internationale [3-5], de deux articles [12, 13] et d'une communication affichée sous forme de poster [21] dans des actes de congrès internationaux.

II.3.1. Description d'une toiture végétalisée

Un toit vert est modélisé en le considérant comme étant composé de trois couches principales, à savoir : la canopée, le substrat de croissance (ou sol) et le support. Comme nous pouvons voir sur la figure II.3, d'autres éléments constitutifs, en particulier le drain, sont adjoints aux trois précédents pour la mise en œuvre pratique d'une toiture végétalisée.

Outre les avantages environnementaux et architecturaux présentés par les toits verts, notre équipe voudrait mettre également en exergue l'économie d'énergie réalisable par le biais d'une toiture

végétalisée en vue de contribuer à la mise en œuvre des bâtiments à énergie positive. Pour ce faire, sa performance énergétique a été comparée avec celle d'un toit conventionnel lequel est constitué uniquement d'une couche de béton similaire au support du toit vert (figure II.4).

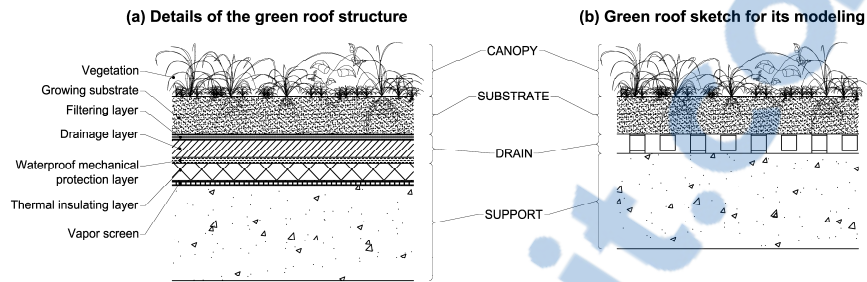


Fig. II.3. Schéma d'une toiture végétalisée

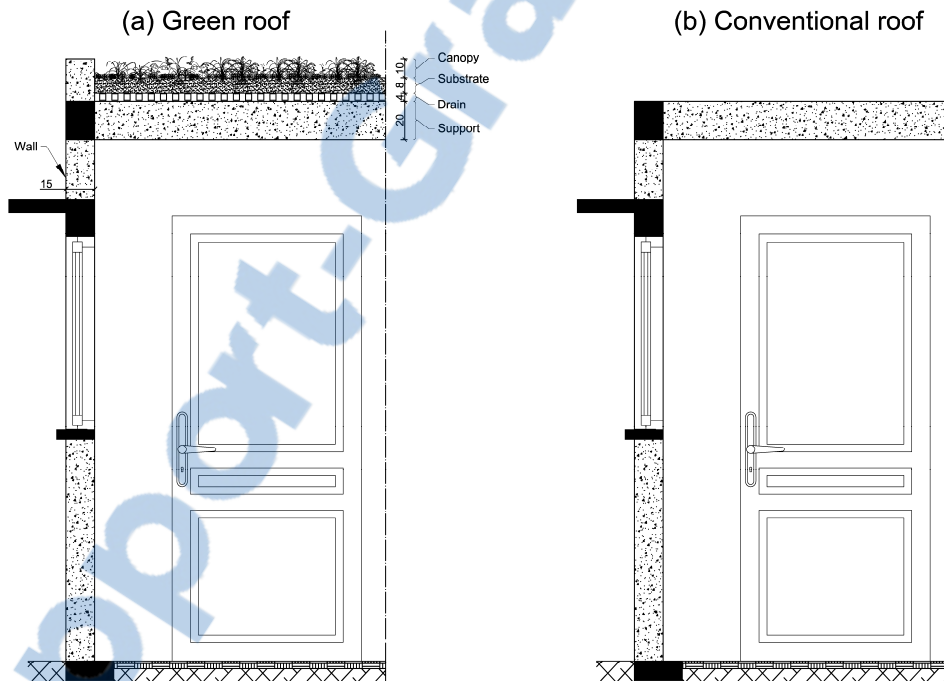


Fig. II.4. Profils d'un toit vert et d'un toit conventionnel

II.3.2. Méthodologies

Dans un premier temps, en nous référant au modèle proposé par Del Barrio [70, 71], nous avons établi un modèle simplifié en appliquant la méthode d'analogie entre les grandeurs électriques et thermiques nous permettant ainsi de dresser un circuit électrique équivalent sur chaque nœud duquel a ensuite été appliquée la loi d'Ohm [3, 12, 13].

La procédure itérative employée pour la résolution des équations de bilan thermique et massique ainsi établies consiste à :

- a) Mettre le système d'équations à résoudre sous forme matricielle du type : $AX = B$, où A est une matrice des coefficients lesquels dépendent généralement des variables inconnues constituant les éléments du vecteur colonne X tandis que B représente le vecteur colonne des connues ;
- b) Initialiser les valeurs des variables inconnues ;
- c) Calculer les coefficients contenus dans la matrice A ;
- d) Résoudre l'équation matricielle susmentionnée par inversion de matrice (plus précisément, les utilisateurs de Matlab [63] utilisent plutôt l'opérateur « backslash » tel que : $X = A \setminus B$ du fait que cette opération est réputée d'être plus rapide que l'inversion des matrices) ;
- e) Les nouvelles valeurs du vecteur X sont adoptées comme solutions en cas d'atteinte de la convergence de ces valeurs ; autrement, les calculs sont repris à partir de c).

Pour l'étude comparative entre les deux types de toits susmentionnés, la différence entre les températures des surfaces supérieures respectives du support du toit vert et du toit conventionnel a été observée [3, 12, 26, 27]. Plus tard, nous avons opté à observer plutôt un autre paramètre de sortie du modèle de toit vert du fait que la différence de températures précédemment citée s'avère difficile à interpréter du point de vue performance énergétique de la toiture végétalisée. Ainsi, le flux de chaleur traversant le toit vert a ensuite été choisi pour être la réponse observée du modèle [4, 5, 13, 28, 32] ; la température de l'air intérieur de la pièce se trouvant juste en dessous du toit vert ayant été supposée comme étant fixe et connue.

Pour palier l'ambiguïté liée au fait que le modèle proposé par Del Barrio [70, 71] précédemment cité ne prend pas en compte la variation de l'humidité du substrat de croissance laquelle est susceptible d'influer sur l'échange thermique ayant lieu dans ce composant du toit vert, notre équipe a ensuite combiné ce modèle avec d'autres modèles dus à Alexandri [72] et Djajig [73]. Les systèmes d'équations de bilan thermique et massique ainsi obtenus sont présentés dans [4]. En outre, les travaux de Ratsimbazafiharivola [32] ont eu pour objectif de simuler la performance énergétique du toit vert en supprimant l'hypothèse de Del Barrio [70, 71] supposant l'humidité du sol comme étant uniforme. Pour cela, la méthode des volumes finis a été utilisée pour obtenir des équations discrétisées lesquelles ont ensuite été mises sous forme matricielle pour être résolues à l'aide de l'algorithme de double balayage [32].

De plus, il s'avère intéressant également d'examiner la variation réelle de la température de l'air intérieur de la pièce sous le toit vert. Ainsi, au lieu de se limiter à la modélisation d'un toit vert considéré isolément par rapport aux autres composants de l'enveloppe du bâtiment, notre équipe a mené une simulation dynamique de l'enveloppe entière du bâtiment doté d'un toit vert afin d'étudier l'impact de la toiture végétalisée sur la performance énergétique de ce bâtiment ; les modèles établis à cet effet étant décrits dans [5].

Pour ce qui est de l'analyse de sensibilité paramétrique des modèles, au lieu de recourir à la méthode de variation une-à-la-fois des paramètres du modèle de toit vert adopté, nous avons opté pour l'analyse de sensibilité globale de ce modèle à l'aide de l'outil GoSAT [2] présenté au Volet I du présent document. En effet, GoSAT permet de connaître non seulement les paramètres les plus influents du modèle étudié mais aussi les sens de leurs effets respectifs sur la réponse observée du modèle. De ce fait, la partie analyse de sensibilité paramétrique de la plupart de nos publications sur ce thème a été menée avec GoSAT, à savoir : [4, 5, 13, 21, 27, 28, 32].

II.3.3. Résultats saillants

Sur la base de l'analyse de sensibilité globale des modèles considérés, les paramètres les plus influents ont été identifiés et classés par ordre de prédominance sur la sortie observée du modèle [3–5, 13, 21, 27, 28, 32]. Un de nos résultats les plus remarquables sur cette sous-thématique a été d'avoir pu montrer que l'influence du toit vert sur la performance énergétique du bâtiment est insignifiante si l'enveloppe du bâtiment est déjà isolée ; par contre, les paramètres liés à la toiture végétalisée sont très dominants de la performance énergétique d'un bâtiment au cas où l'enveloppe de ce dernier ne comporte pas d'élément isolant. En effet, nous pouvons constater sur la Fig. II.5. que, pour un bâtiment non isolé, les deux premiers paramètres les plus influents sont spécifiques au toit vert (le taux de couverture végétale σ_f et l'épaisseur du substrat de croissance L_g), en troisième position de prédominance arrive le facteur d'ombre du vitrage S_c , suivi de deux autres paramètres caractéristiques du toit vert (l'indice de surface foliaire LAI et l'épaisseur de la canopée L_{can}) [5, 21]. Bien que notre méthode soit différente de celles employées respectivement par Jaffal *et al.* [74] et Kotsiris *et al.* [75], les conclusions susmentionnées concernant l'impact du toit vert dépendant de l'isolation de l'enveloppe de l'habitat étudié sont en parfait accord avec les leurs.

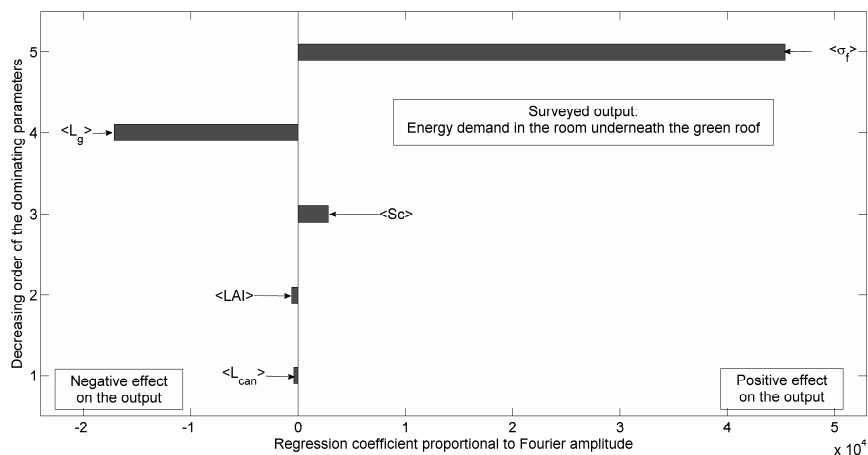


Fig. II.5. Les paramètres les plus influents sur la performance énergétique d'un bâtiment non-isolé

Volet III : MAITRISE DE L'ÉNERGIE RENOUVELABLE

III.1. Etude théorique d'un système de climatisation solaire à déshydratant liquide

Nombreuses régions de Madagascar présentent des forts potentiels d'ensoleillement [7]. Le travail rapporté dans la présente section est une investigation théorique d'un système de climatisation solaire à cycle ouvert utilisant la solution aqueuse de chlorure de lithium (LiCl) comme déshydratant liquide. L'objectif principal du travail a été d'analyser le comportement du système de rafraîchissement considéré vis-à-vis des charges internes et des sollicitations externes ainsi que d'identifier les facteurs clés nous permettant d'améliorer la performance globale du système. Pour ce faire, notre équipe a modélisé le système de rafraîchissement solaire étudié pour ensuite développer un code de calcul permettant de mener une analyse de sensibilité paramétrique du modèle proposé.

Dans cette investigation, notre équipe a opté pour un procédé de refroidissement à cycle ouvert lequel est basé sur le principe de traitement direct de l'air. En effet, la technique consiste à déshumidifier l'air à l'aide d'un déshydratant et à le refroidir à travers un échangeur thermique (caloduc par exemple) et finalement à le rafraîchir, selon la condition de confort requise, par un processus évaporatif.

Il convient de noter que les systèmes à déshydratants liquides présentent certains avantages par rapports aux systèmes à déshydratants solides puisqu'au niveau de ces systèmes, nous pouvons dénoter [22]:

- un faible chute de pression de l'air à travers le matériau déshydratant,
- une facilité de manipulation et une plus grande mobilité,
- le coefficient de performance (COP) de ces systèmes est deux fois plus élevé par rapport aux systèmes à déshydratant solide.

La figure III.1. schématise la configuration du système de climatisation solaire étudié. L'air extérieur (A) entre dans le système par l'absorbeur à la sortie duquel (A-2) son humidité est réduite. Notons que le déshydratant liquide, au niveau de l'absorbeur, absorbe la vapeur d'eau contenue dans l'air et que ce phénomène d'absorption induit l'augmentation de la température de l'air à sa sortie (l'absorption étant un processus libérant de la chaleur). Ayant subi une élévation de température, l'air atteint le caloduc (2-3) à travers lequel sa température diminue. En effet, au niveau de l'échangeur, l'air cède de la chaleur à l'air extrait de l'intérieur de la pièce. Ensuite, l'air passe par un évaporateur au sein duquel sa température baisse et son humidité augmente par processus évaporatif lequel consomme de la chaleur et produit du froid. Finalement l'air, admettant la température et l'humidité requises pour le confort, est insufflé dans la pièce à climatiser. L'air extrait (R) de la pièce est refroidi à travers un évaporateur (identique au précédent) (R-1) puis consomme de la chaleur sensible (chaleur cédée par l'air entrant) au niveau de l'échangeur thermique pour être enfin rejeté vers l'extérieur (1-S). Le système de chauffage solaire à eau est représenté sur la figure III.2.

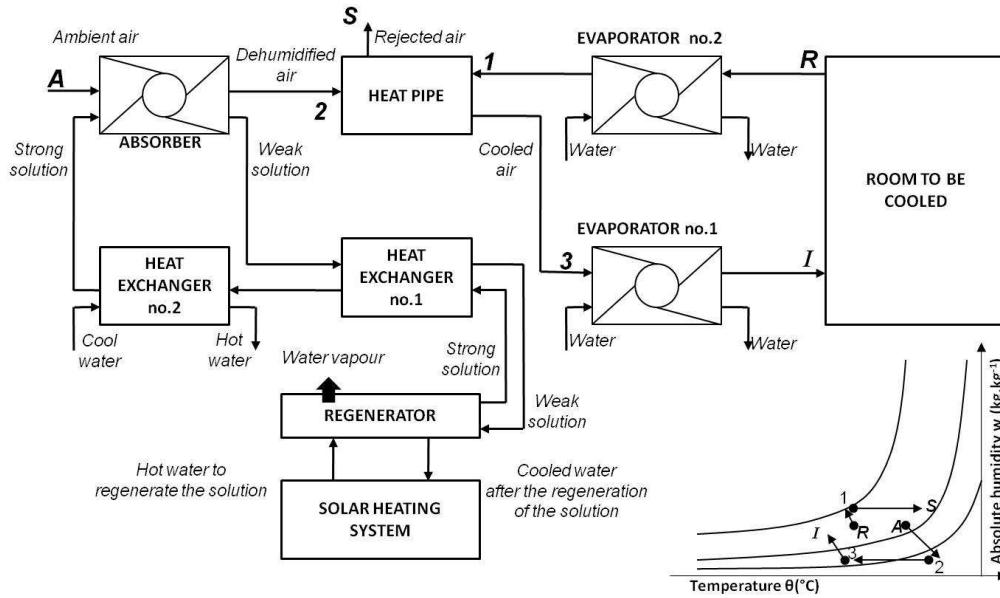


Fig. III.1. Configuration du système de climatisation solaire étudié

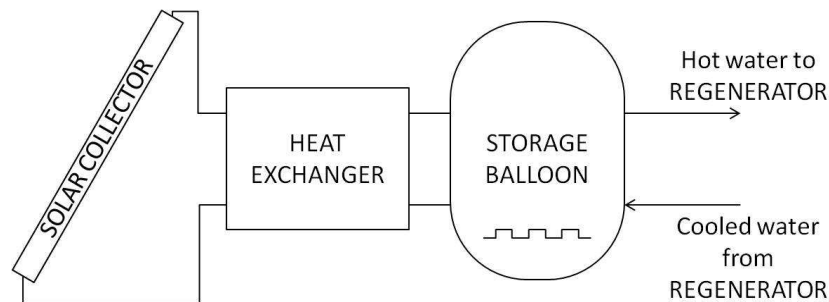


Fig. III.2. Configuration du système de chauffage solaire à eau

Le modèle établi ainsi que la procédure itérative de calcul numérique adoptée pour la simulation du comportement du climatiseur solaire étudié sont présentés dans [6, 22].

Les résultats des simulations ont permis de justifier la configuration du système de climatisation solaire proposée par notre équipe. De plus, de façon analogue qu’au Volet précédent, l’analyse de sensibilité globale du modèle associé à ce climatiseur solaire nous a permis d’identifier les paramètres les plus influents et de les classer par ordre de prédominance sur le coefficient de performance (COP) de ce système de climatisation. De ces résultats, des recommandations ont été émises concernant le choix de chaque composant du système ainsi que la conduite du procédé de rafraîchissement avec ce genre de système [6].

III.2. Evaluation du potentiel en énergie solaire de huit sites principaux de Madagascar en vue la production d’électricité avec des centrales « dish stirling »

L’énergie solaire fait partie des ressources renouvelables pouvant être convertie en énergie électrique. Comme l’intitulé de la présente section l’indique, le travail rapporté ici a pour objectif l’évaluation du potentiel en énergie solaire de huit principaux sites de Madagascar en cas

d'utilisation du système de production d'électricité connu sous l'appellation de centrale « dish stirling ». La figure III.3. montre les localisations géographiques des huit sites en question. Plus précisément, six des huit sites sont localisés sur les zones côtières de l'île avec une altitude z en dessous de 100 mètres (m), à savoir : Diego Suarez ou Antsiranana ($z = 105 m$), Nosy Be ($z = 9 m$), Majunga ou Mahajanga ($z = 18 m$), Sambava Sud ($z = 5 m$), Tamatave ou Toamasina ($z = 6 m$) et Fort-Dauphin ou Taolagnaro ($z = 9 m$) ; tandis que les deux autres sites sont situés sur les Hautes Terres dont Antananarivo ($z = 1300 m$) et Fianarantsoa ($z = 1109 m$).

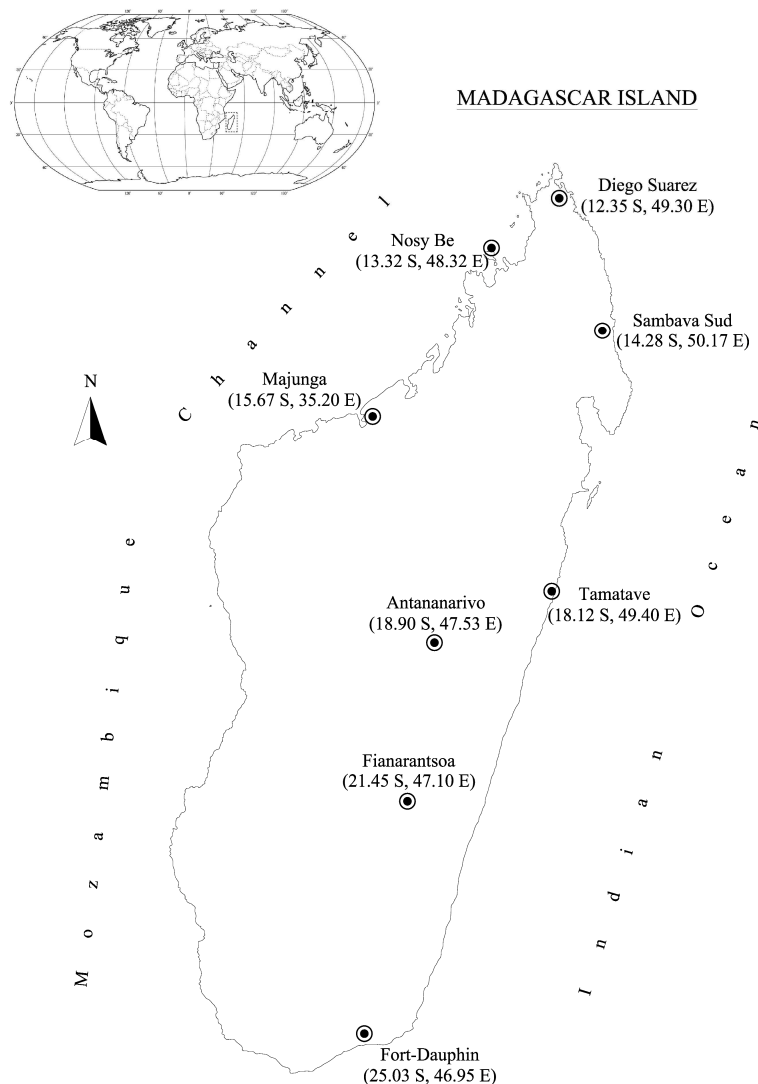


Fig. III.3. Localisations géographiques des huit sites concernés par l'investigation

Illustré sur la figure III.4., une centrale « dish stirling » comprend un miroir concentrateur parabolique, un récepteur thermique et un moteur Stirling positionné au foyer du concentrateur [76] ; l'ensemble de ces composants étant monté sur une structure traquant la course du soleil en pivotant sur un ou deux axes [77].

Comme nous pouvons voir sur cette figure III.4., un moteur Stirling opère suivant un cycle thermodynamique régénératif fermé utilisant un gaz de travail subissant une détente et une compression à des températures différentes [78]. Deux systèmes de chauffage et de refroidissement

permettent respectivement de chauffer et de refroidir le gaz de travail lequel est réintroduit par un régénérateur se trouvant entre ces deux systèmes.

Les dimensions du miroir parabolique dépendent de la taille de l'aperture qui non seulement influe sur le flux de radiation solaire intercepté mais augmente aussi les pertes convectives et radiatives au niveau de l'absorbeur [79]. Ainsi, l'absorbeur est entouré d'une certaine couche d'isolants afin que le transfert thermique ayant lieu sur ce composant se fasse uniquement par conduction.

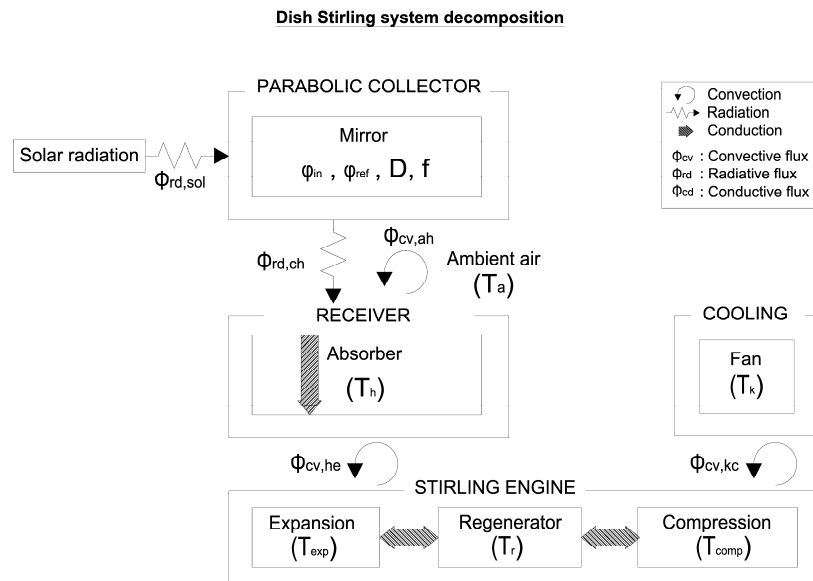


Fig. III.4. Schéma synoptique des phénomènes ayant lieu au niveau d'un système « dish stirling »

Le modèle mathématique associé au système de « dish stirling » considéré est présenté dans [7].

Pour les simulations, notre équipe a utilisé une série de données météorologiques de 365 jours, du 1^{er} janvier au 31 décembre 2007, relative à chacun des huit sites considérés.

Notre équipe a pu tirer comme résultats saillants de cette investigation que les rendements thermiques du système sur les sites considérés sont fonctions de l'efficacité thermique du miroir concentrateur parabolique et sont influencés par les conditions météorologiques régnant sur chacun de ces sites. Ainsi, les zones côtières sont plus propices à l'usage de ce type de centrale solaire de production d'électricité car la moyenne annuelle du rendement énergétique du système « dish stirling » y est supérieur à 30% ; en particulier au Nord à Antsiranana ou Diego Suarez (31,65 %), au Nord Ouest à Mahajanga ou Majunga (31,07 %) ainsi qu'au Sud à Taolagnaro ou Fort-Dauphin où le rendement est maximal comparé à ceux relatifs aux autres sites (32,17 %). En revanche, les sites se trouvant dans la partie Est et sur les Hautes Terres de l'île sont moins adaptés à la centrale « dish stirling » même si le rendement peut, par exemple à Antananarivo, atteindre la valeur de 30,51 % parfois. Notons toutefois que tous les sites considérés présentent des rendements supérieurs à 21% [7].

III.3. Etude technico-économique de la récupération d'excès de chaleur au niveau d'un centre de cure thermale pour la production d'eau chaude sanitaire d'un Hôtel à Antsirabe

Pour se conformer aux normes internationales en matière d'hôtellerie et par suite améliorer sa capacité d'accueil des touristes dans la « ville d'eaux », l'Hôtel des Thermes a, entre autres obligations, à satisfaire les besoins en eau chaude sanitaire de ses clients. Disposant de 28 chambres et de 3 suites, cet hôtel à 3 étoiles peut accueillir jusqu'à 72 occupants et son besoin journalier maximum (correspondant à 100% de taux d'occupation) en eau chaude sanitaire est estimé à 5,76 m³ ; le dispositif utilisé à cet effet étant uniquement le chauffe-eau électrique.

A l'instar du mix électrique des autres grandes agglomérations de l'île, l'énergie fossile tient encore une part importante pour la production d'électricité consommée dans cette ville industrielle. Ainsi, notre équipe souhaite proposer à cet hôtel des solutions en énergie renouvelable lui permettant de réaliser de l'économie d'énergie et de contribuer à la réduction de l'émission des gaz à effet de serre liée à la combustion des ressources fossiles.

Bien que la solution habituellement avancée en pareil circonstance soit l'utilisation du chauffe-eau solaire, il pourrait y avoir une autre option plus intéressante pour l'Hôtel des Thermes du fait de sa proximité au centre de cure thermale d'Antsirabe. En effet, ce centre utilise deux puits thermaux, respectivement baptisés ici R₁ et R₂, dont le premier (R₁) sert à alimenter en eau chaude (42°C) ses différentes salles de cure thermale tandis que le second (R₂) approvisionne en eau chaude thermale de température d'environ 52°C uniquement des installations périphériques telles que la piscine, le jacuzzi et le spa. En particulier, la piscine doit être remplie plusieurs heures nocturnes avant son ouverture quotidienne pour laisser son eau se refroidir à l'air libre jusqu'à atteindre une température supportable par le public (36°C). Il y a donc un important excès de chaleur que nous pouvons récupérer pour être utilisé ailleurs.

De ce fait, l'objectif du travail rapporté sur la présente section est de réaliser une étude technico-économique d'un système de récupération d'excès de chaleur que notre équipe propose d'installer au niveau du puits R₂ du centre de cure thermale susmentionné afin de produire de l'eau chaude sanitaire à canaliser avec un tuyau convenablement calorifugé sur une distance d'environ 300 mètres vers l'Hôtel des Thermes (Figure III.5.).

Ainsi, le principal système de récupération d'excès de chaleur adopté à cet effet est un échangeur à plaques à placer juste à la sortie du puits R₂ (Figure III.6.).

Dans un premier temps, les besoins en eau chaude sanitaire de l'Hôtel des Thermes ont été déterminés en utilisant un code approprié, baptisé Solo, disponible gratuitement en ligne. Ensuite, la méthode d'efficacité NUT a été utilisée pour dimensionner l'échangeur à plaques à employer pour récupérer l'excès de chaleur géothermique.

La performance de la solution géothermique hybride proposée a été comparée avec celle du chauffe-eau solaire hybride en termes de consommation d'électricité liée l'ajustement par appoint électrique de la température de l'eau chaude sanitaire produite par chacune de ces deux solutions.

Il découle des résultats de cette étude comparative que la solution géothermique hybride proposée s'avère techniquement plus avantageux et permet d'effectuer 73,2% d'économie d'énergie alors que l'option solaire hybride en permet seulement 54,9%. De plus, les résultats de l'évaluation

économique ont confirmé que la solution géothermique proposée permet d'obtenir favorablement un retour d'investissement en un temps plus court.

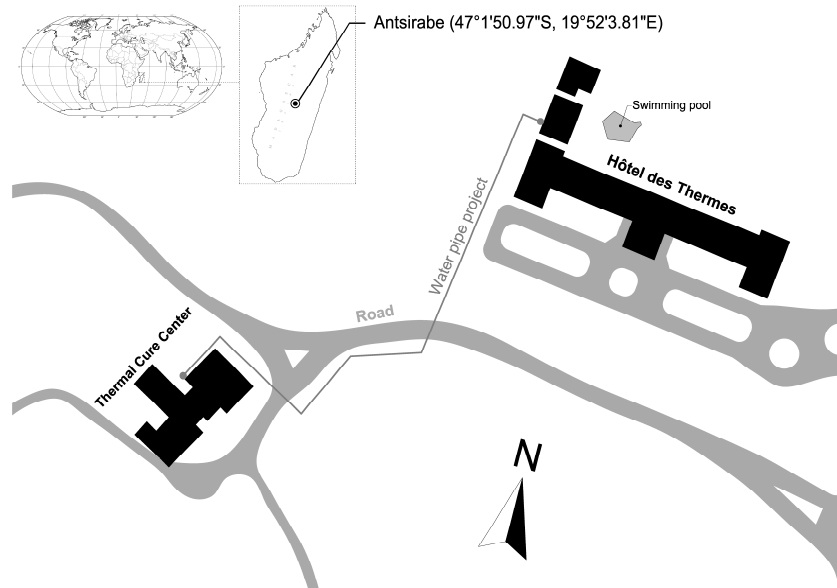


Fig. III.5. Localisation du projet de transport d'eau chaude à partir du centre de cure thermale jusqu'à l'Hôtel des Thermes de la Ville d'Antsirabe

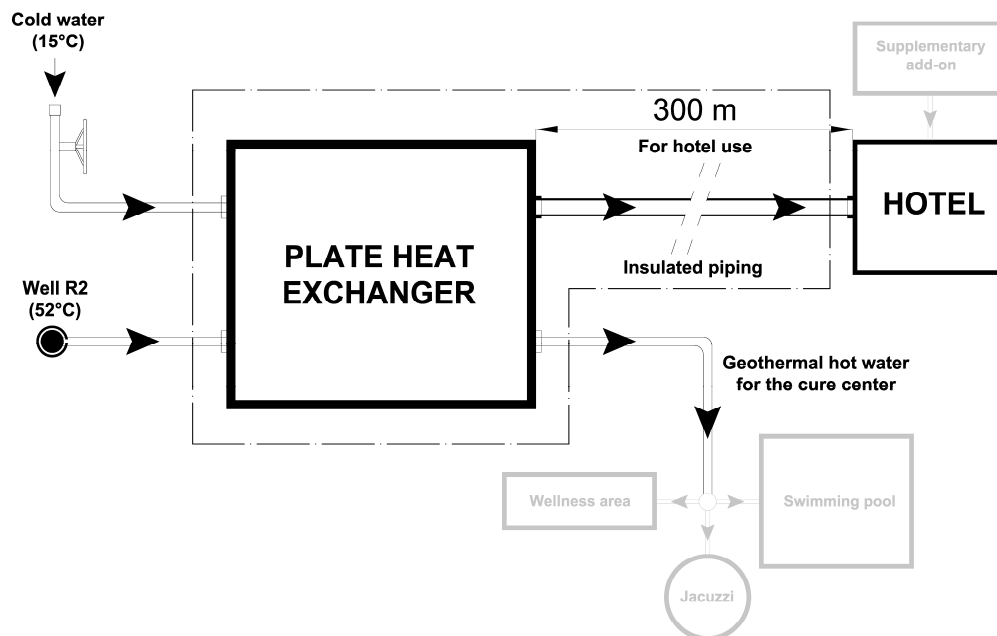


Fig. III.6. Schéma du système de récupération d'excès de chaleur à étudier

La méthodologie utilisée, les résultats obtenus et leur interprétation, sont détaillés dans [8].

III.4. Analyse de sensibilité paramétrique pour optimiser un système de rafraîchissement solaire à absorption

Cette étude a été faite en collaboration avec l'équipe du Laboratoire PIMENT qui a mis sur pied, à l'Université de la Réunion en 2007, un système de climatisation solaire à absorption lequel est dénommé par la suite SAC (Solar Absorption Cooling plant) et est représenté sur les figures III.7.a. et III.7.b.

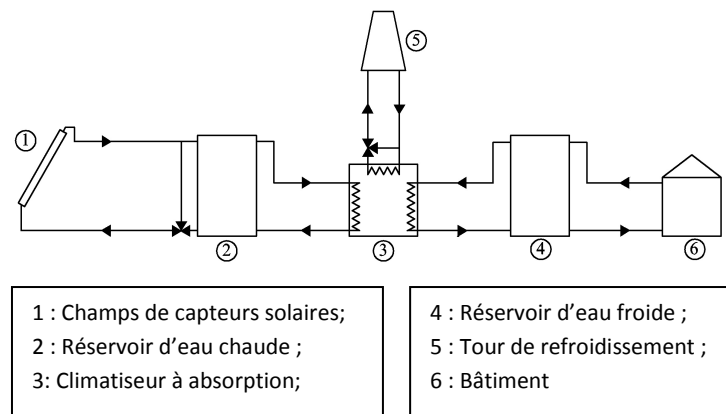


Fig. III.7.a. Schéma synoptique de l'installation SAC

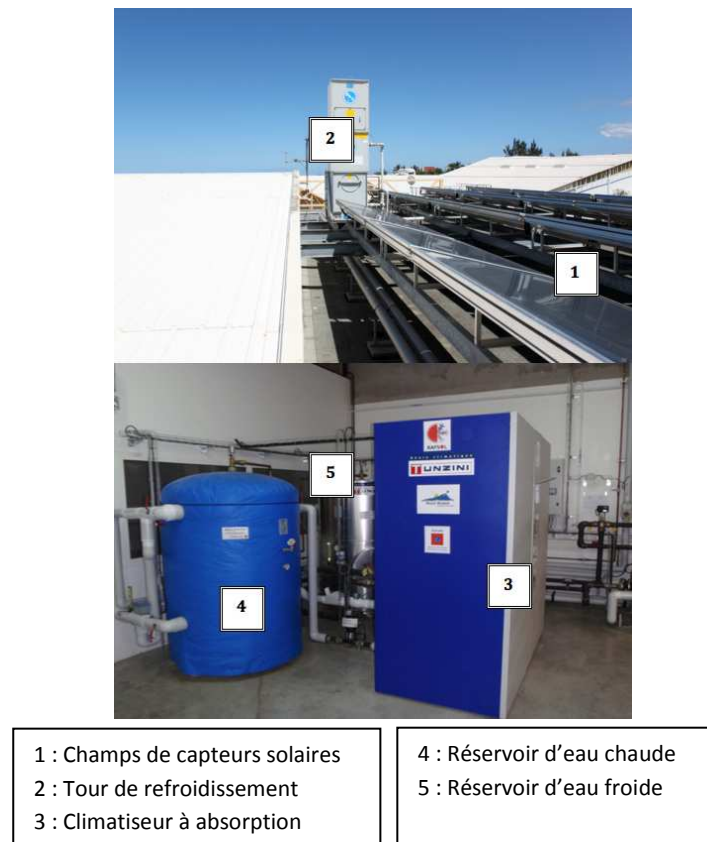


Fig. III.7.b. Photographies du système de climatisation solaire à absorption (SAC) considéré

Des études expérimentales et théoriques de ce système de climatisation solaire ayant déjà été menées par l'équipe du PIMENT antérieurement [80, 81], notre contribution porte sur l'analyse de sensibilité du modèle mathématique déjà établi dans [80].

A cet effet, au lieu d'utiliser l'outil GoSAT [2], nous nous sommes convenus d'utiliser directement la méthode FAST sur laquelle, rappelons-le, GoSAT est également basée.

Du fait qu'un certain nombre d'équations figurant dans notre article scientifique [9] présentent des erreurs de mise en forme, les équations relatives à cette méthode FAST sont brièvement décrites ci-après.

La méthode FAST (ou Fourier Amplitude Sensitivity Test) est une méthode basée sur la variance. Elle permet de quantifier la contribution de chaque facteur à la variance de la réponse du modèle étudié.

Ainsi, pour un modèle numérique ayant une sortie Y et p différents paramètres d'entrée regroupés dans un tableau X tel que $X = \{X_1, X_2, \dots, X_p\}$ et $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_p)$, le principe de cette méthode consiste à varier chaque paramètre d'entrée suivant une fonction périodique et de déterminer l'effet de ces variations sur la variance de la réponse Y du modèle. Pour ce faire, une fréquence propre est assignée à chacun des facteurs de telle sorte que leur échantillonnage s'effectue à l'aide de l'équation suivante

$$X_{i,k} = G_i(\sin(\omega_i s_k)), \quad \text{avec } s_k = \frac{2\pi k}{N} \quad (28)$$

où N est le nombre total des simulations, k ($k = 1, 2, \dots, N$) représente le numéro de simulation, ω_i est la fréquence associée au paramètre X_i ($i = 1, 2, \dots, p$) et G_i est une fonction choisie selon la densité de probabilité de X_i pour donner une bonne représentation d'une large gamme de facteurs. Sur ce point, Mara *et al.* [82] ont proposé une méthode d'échantillonnage des facteurs en 2002 :

$$G_i(x) = X_i^* + \frac{\delta_i}{\pi} \arcsin(x) \quad (29)$$

dans laquelle, X_i^* est la valeur de base (ou valeur nominale) du paramètre X_i tandis que δ_i représente la demi-largeur de la plage de variation du paramètre X_i tel que $X_{i,k} \in [X_i^* - \delta_i, X_i^* + \delta_i]$.

Il est à noter que le nombre total de simulations N est défini selon le critère de Shannon tel que

$$N = 2 \omega_{max} + 1 \quad (30)$$

où ω_{max} est la fréquence maximum (y comprises les fréquences induites)

Ainsi, l'espérance de la sortie Y peut être approximée par :

$$E(Y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) ds \quad \text{avec } f(s) = f(G_1(\sin(\omega_1 s)), G_2(\sin(\omega_2 s)), \dots, G_k(\sin(\omega_k s))) \quad (31)$$

De plus, compte tenu des propriétés des séries de Fourier, une approximation de la variance de Y est donnée par [83]:

$$Var(Y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [f(s)]^2 ds - E^2(Y) = 2 \sum_{i=1}^{\infty} (A_i^2 + B_i^2) \quad (32)$$

où A_i et B_i sont les coefficients de Fourier de Y à la fréquence ω_i et peuvent être déterminés à l'aide des relations suivantes :

$$A_i = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos(\omega_i s) ds \quad (33)$$

$$B_i = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin(\omega_i s) ds \quad (34)$$

Similairement qu'en GoSAT [2], la transformée de Fourier de la sortie Y du modèle est calculée en vue de sa présentation spectrale. L'identification de la fréquence de chaque pic du graphe ainsi obtenu permet de déterminer les facteurs les plus influents.

L'analyse de sensibilité a été menée sur les modèles associés aux différents sous-systèmes de l'installation SAC : le champ des capteurs solaires, les réservoirs d'absorption et de stockage.

De l'application de la méthode FAST sur l'ensemble des composants du SAC, découle la prédominance de deux paramètres dont la radiation solaire et la température d'entrée à l'évaporateur. Il est à noter que les charges du bâtiment sont directement tributaires de l'importance de ce dernier paramètre.

De plus, il ressort des simulations visant l'optimisation de configuration du SAC qu'il serait plus avantageux d'opter pour une distance de 10 m entre le champ de capteurs solaire et le réservoir d'eau chaude au lieu de la distance actuelle de 100 m. En effet, une hausse de 12% de la puissance de l'évaporateur a été constatée, ce qui est clairement significatif pour une installation de rafraîchissement solaire de ce type.

Bref, l'analyse FAST a permis d'identifier les paramètres les plus influents sur la performance de cette installation de rafraîchissement solaire à absorption. Les résultats de cette analyse, dont certains ne sont pas rapportés dans la présente section mais aux recueils de nos publications [9], sont particulièrement utiles pour aider les concepteurs dans l'optimisation des valeurs de certains paramètres contrôlables, comme le débit d'eau, et dans le dimensionnement d'un certain nombre de composants de l'installation, comme la surface de l'échangeur.

III.5. Etude expérimentale de la co-digestion anaérobie de quelques déchets organiques à Madagascar

Ce sujet de recherche s'inscrit non seulement dans le cadre de l'ingénierie de l'énergie renouvelable mais touche aussi le thème du génie de l'environnement du fait qu'il vise le traitement par valorisation énergétique des déchets organiques.

Ce travail de recherche expérimentale fait suite à la mise au point d'un biodigester de production de biogaz à usage domestique baptisé BioD et pour lequel mon équipe de recherche a enclenché en 2015 une procédure de brevetage auprès de l'Office Malgache des Propriétés Industrielles (OMAPI) ; le résultat de cette demande de brevet sera donc connu dans le courant de cette année 2016.

Pour conduire les expérimentations, 6 unités de biodigesteurs métalliques ont été conçues. Pour ne pas entraver la procédure de brevetage en cours, la présentation du dispositif expérimental est limitée dans le présent document à une brève description sans illustration. Ainsi, chaque unité de biodigester, de volume total de 420L, est principalement constituée de 2 fûts métalliques soudés

bout à bout. A l'aide d'un système de vannage et de tuyauterie, le biogaz produit peut être collecté et stocké de deux manières différentes selon son utilisation. En cas d'usage domestique, un système de stockage constitué d'un autre fût métallique rempli d'eau et sur lequel un fût plastique est renversé, a été conçu pour stocker le biogaz produit. Par contre, pour cette étude expérimentale où il a été nécessaire de mesurer toutes les deux heures la quantité du biogaz produit, celui-ci a été stocké dans un sachet plastique tubulaire. Ainsi, en fermant une vanne de la conduite du biogaz et en ficelant l'extrémité ouverte du sachet plastique rempli de biogaz, l'expérimentateur a détaché ce dernier de l'unité de biodigester pour le peser avec une balance de précision d'une capacité de $2000 \pm 0,1$ (g).

Les co-substrats utilisés lors de cette campagne d'expérimentation sont constitués de divers mélanges de déchets organiques abondamment disponibles localement. Le tableau n°1 résume la nature des co-substrats introduits dans les 6 biodigesteurs $D_{j,j=1 \text{ à } 6}$.

Tableau n°1. Nature des co-substrats introduits dans les 6 unités de biodigesteurs

Digester	Nature du co-substrat
D_1	Mélange de bouse de zébu, de fiente de volailles, de lisier de porc à égale proportion volumique (1:1:1) et de l'eau
D_2	Mélange de bouse de zébu, de paille de paddy à égale proportion volumique (1:1) et de l'eau
D_3	Mélange de bouse de zébu, de paille de paddy à proportion volumique (1:2) et de l'eau
D_4	Mélange de bouse de zébu, de paille de paddy à proportion volumique (1:3) et de l'eau
D_5	Mélange de bouse de zébu, de jacinthe d'eau à égale proportion volumique (1:1) et de l'eau
D_6	Mélange de bouse de zébu, de jacinthe d'eau à proportion volumique (2:1) et de l'eau

Chaque biodigester a été rempli à 75% de son volume avec un mélange de substrat (ou co-substrat) et de l'eau à même quantité volumique. Pour assurer l'effectivité de la décomposition anaérobique des co-substrats introduits dans les biodigesteurs, un délai de 15 jours a été laissé s'écouler avant d'entamer la première mesure de la quantité de biogaz produit par chaque biodigester. Ensuite, la poursuite des mesures s'est effectuée toutes les 2 heures pendant 17 jours. Il convient de noter qu'à l'exception du biodigester D_1 fonctionnant en discontinu, chacun des 5 autres biodigesteurs a été quotidiennement alimenté de 5 à 10L de co-substrat de nature identique à celui déjà disponible en son sein.

Parallèlement à la mesure de la quantité de biogaz produit par chaque biodigester, la température de celui-ci et le *pH* de son co-substrat ont également été mesurés en utilisant respectivement un thermomètre à sonde de marque POLDER et un pH-thermomètre de marque Hanna Instrument (modèle HI98127) lequel permet aussi d'obtenir la température ambiante. Notons également qu'un détecteur de fuite a été utilisé pour détecter l'éventuelle fuite au niveau de chaque conduit de biogaz connecté au stockage en sachet plastique tubulaire.

Les résultats de ce travail expérimental peuvent être résumés de la manière suivante [10,53] :

La co-digestion anaérobie des co-substrats considérés dans cette étude est due aux activités des bactéries mésophiles et thermophiles et possède des valeurs de pH oscillant autour de la neutralité, c'est-à-dire, comprises entre 6,8 et 7,5.

La comparaison des quantités de biogaz produits à partir des co-substrats alimentant les 6 biodigesteurs a permis de conclure que le meilleur co-substrat est celui du biodigesteur D_2 , obtenu en mélangeant de la bouse de zébu avec de la paille de paddy à égale proportion volumique (1:1), avec une production totale de biogaz de l'ordre de 5,041 (kg) durant les 17 jours d'expérimentation. En revanche, la plus faible quantité de biogaz est celle produite par le biodigesteur D_2 (1,987 kg sur 17 jours) contenant du co-substrat à mélange de bouses de zébu, de fientes de volailles et de lisiers de porc à égale proportion volumique (1:1:1).

Par le biais du lissage des courbes expérimentales relatives à chaque type de co-substrat étudié, un modèle de prédiction de la quantité de biogaz produit en fonction de la température du biodigesteur et du pH de son co-substrat a été proposé ; la fiabilité de ce lissage ayant été prouvée en montrant des valeurs statistiquement acceptables du coefficient de détermination R^2 . Cependant, il y a lieu de prendre en considération également les effets d'autres paramètres tels que l'acide gras volatil (AGV), le taux de solides volatils, la matière sèche, ou encore la matière organique, afin d'obtenir une meilleure qualité de lissage de modèle expérimental.

III.6. Etude théorique d'un séchoir-serre à moindre coût pour les produits agricoles

Les petits paysannats malgaches préfèrent encore sécher leurs produits à l'air libre qu'utiliser les séchoirs sur lesquels nombreux travaux de recherche ont pourtant été menés à Madagascar depuis les années 80 [89,90]. Dans le dessein de proposer aux paysans un système de séchage simple d'utilisation et utilisant également l'énergie solaire à l'instar du séchage à l'air libre, nous avons effectué l'étude théorique d'un séchoir serre de section droite triangulaire isocèle de très faible coût schématisé sur la figure (III.8). Parmi les principaux avantages de ce type de séchoir sont la facilité de son montage par les paysans et l'abondance de ses matériaux de construction.

La modélisation de ce système de séchage solaire à l'aide de la méthode des analogies électriques étant présenté dans le mémoire d'Ahamadi [24] et notre publication [15], un code de calcul associé au modèle ainsi établi a été mis au point sous Matlab. L'ananas et la pomme ont été choisis comme produits à sécher pour les simulations. Il découle des résultats des simulations que la conduite du séchage est tributaire des facteurs météorologiques notamment l'ensoleillement. Néanmoins, le procédé présente, par rapport au séchage à l'air libre, nombreux autres avantages en plus de ceux susmentionnés, dont l'hygiène et la possibilité d'achever en moins de 8 heures, donc moins d'une journée, le séchage en couche mince des produits susmentionnés. En outre, le code de calcul cité précédemment permet aussi de faire l'étude de dimensionnement et d'optimisation du séchoir-serre ainsi que l'analyse de sensibilité paramétrique du modèle proposé, ce qui faisait l'objet du mémoire de Rakotoarisoa [29].

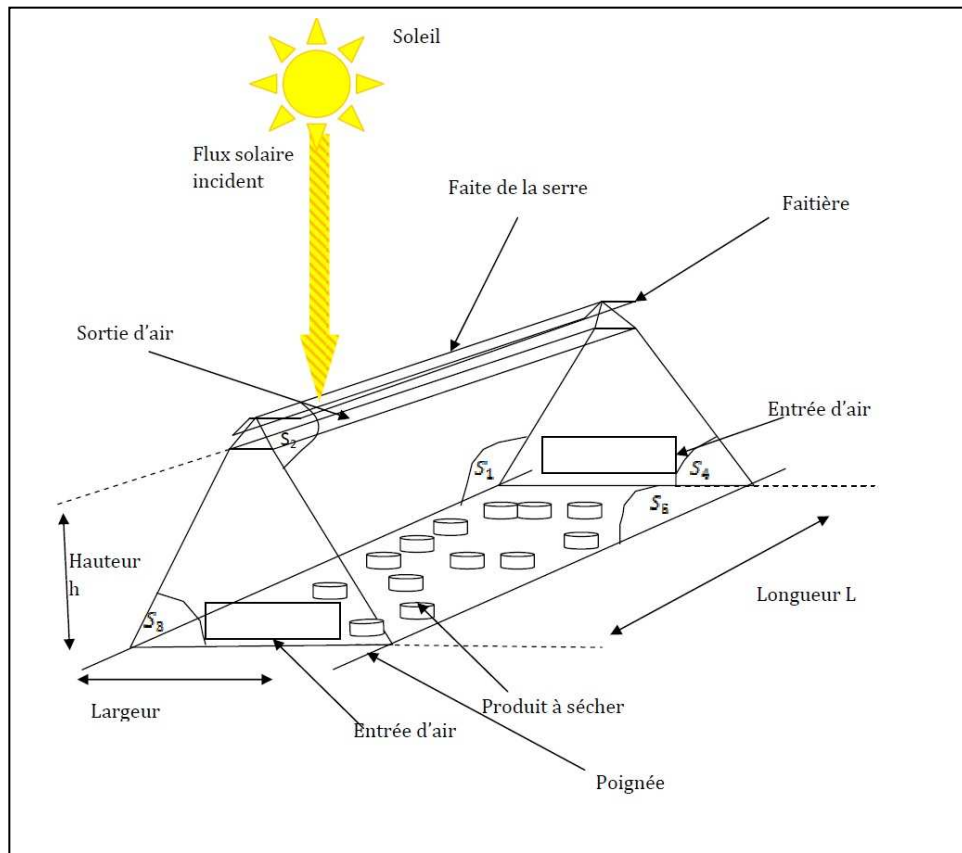


Fig. III.8. Schéma du séchoir-serre triangulaire isocèle modélisé

Volet IV :
ETUDE THEORIQUE DES ECOULEMENTS DANS UN RESERVOIR PETROLIER -
CAS DE TSMIRORO MADAGASCAR

Certes, le pétrole est une énergie non renouvelable. Cependant, vue la place qu'il occupe dans le contexte socio-économique de tout un pays et compte tenu de l'avancée technologique actuelle permettant la viabilité économique de l'exploitation d'un certain nombre de réserves pétrolières de l'île, l'extraction de celles-ci peut bien booster le développement économique de Madagascar à condition que le peuple malgache sachent éviter la guerre civile.

De ce fait, notre équipe estime que, dans le cadre de la transition énergétique, effectuer des travaux de recherche ayant lien avec l'extraction du pétrole est encore d'actualité.

En effet, l'exploitation pétrolière représente un important investissement et la maîtrise d'une exploitation rationnelle d'un gisement revient à maîtriser divers techniques scientifiques dont la compréhension de la dynamique des fluides en place.

Le travail rapporté dans le présent Volet est une étude théorique du comportement dynamique d'un réservoir pétrolier lors de son exploitation. Plus précisément, le procédé d'exploitation consiste à introduire un gaz miscible dans la phase huile du gisement à l'aide de quatre puits injecteurs lesquels sont placés sur les quatre coins du réservoir alors que le puits producteur se situe au milieu de celui-ci (Figure IV.1.).

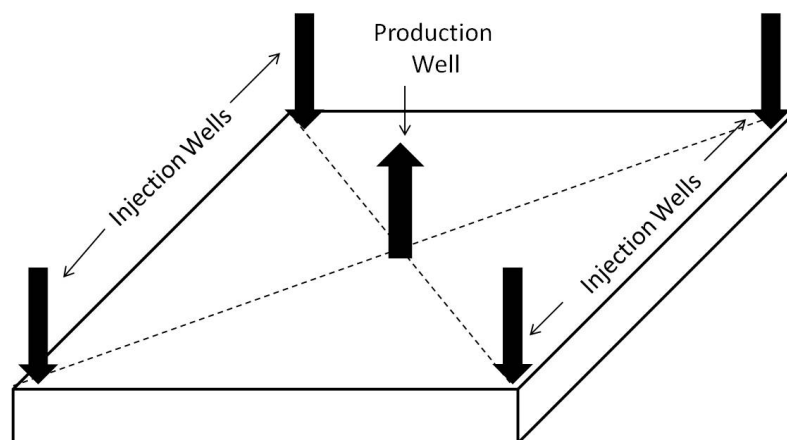


Fig. IV.1. Schéma du réservoir avec quatre puits d'injection aux coins et un puits de production au milieu

Ainsi, un écoulement compressible triphasique multicomposant en milieu poreux a été étudié en utilisant le modèle « black-oil ». Plus exactement, trois composantes ont été considérées : une composante légère (gaz) laquelle peut être présente à la fois dans la phase huile et dans la phase gaz, une composante lourde laquelle est présente uniquement dans la phase huile, et une composante eau laquelle est l'unique occupant de la phase aqueuse.

Cette étude diffère des autres travaux portant sur les écoulements compressibles triphasiques [84-87] sur le fait que la pesanteur et la miscibilité d'une composante légère dans la phase huile ont été prises en compte dans la modélisation. Le modèle ainsi obtenu est complexe dans la mesure où il est constitué d'un système de plusieurs équations aux dérivées partielles non linéaires. Une

discrétisation en volumes finis du modèle a permis de mettre au point un code de calcul qui a servis à faire des expériences numériques sur le gisement de Tsimiroro Madagascar.

Les équations du modèle proposé, la méthode utilisée pour leur résolution, les résultats des simulations ainsi que leur interprétation sont données dans notre publication [11] ou encore dans la thèse d'Ahamadi [57].

Comme résultats saillants, il découle de l'analyse des contours de saturations respectives des trois phases huile, gaz et eau que la loi de conservation du volume poral est bien respectée. Par ailleurs, plus on s'éloigne des puits injecteurs vers le puits producteur, plus faible est la pression au niveau du réservoir. Toutefois, au cours du temps de production, il a été constaté une augmentation de la valeur de cette variable du modèle. De plus, un débit d'huile important est cumulé au puits producteur, tandis que les phases aqueuse et gazeuse y sont présentes en faible débits cumulés. Autrement dit, la mobilité de l'huile dépend beaucoup de la saturation en gaz. Le modèle proposé permet ainsi la prédiction du comportement dynamique du réservoir étudié.

Volet V :**TRAITEMENTS DES BOUES DES STATIONS D'EPURATION
EN VUE DE LEUR VALORISATION ENERGETIQUE**

Le présent volet synthétise les valorisations scientifiques postdoctorales de mes travaux de thèse de doctorat [1] ainsi que ceux de Morau [99], un collègue du Laboratoire PIMENT de l'Université de la Réunion, dont les travaux constituent la suite des miens. En effet, pour limiter la pollution des milieux naturels dans lesquels se déversent les eaux usées, il importe de les traiter préalablement dans des stations d'épuration. Ainsi, le principal sous-produit de ce type de traitement est la boue d'épuration laquelle contient en grande partie des composants organiques permettant sa valorisation énergétique par incinération, par méthanisation ou encore par épandage agricole. Par ailleurs, le procédé de séchage facilite grandement le transport et les valorisations susmentionnées. Ainsi, mes travaux de thèse [1], lesquels ont résulté 3 publications [16, 17, 19] et une communication affichée [20] lors des congrès internationaux à comité de lecture avec diffusion d'actes, ont porté sur deux filières de traitement des boues des stations d'épuration, à savoir : le séchage thermique et la méthanisation.

V.1. Séchage thermique des boues des stations d'épuration*V.1.1. Etude théorique et expérimentale du séchage des boues dans un séchoir solaire indirect [17]*

L'objectif d'étude théorique est d'identifier, à l'aide de la méthode d'analyse de sensibilité globale FAST, les paramètres les plus influents dans la conduite du séchage indirect des boues des stations d'épuration tandis que celui de l'étude expérimentale est caractériser la cinétique de séchage de ce produit.

Pour l'étude théorique, le système de séchage solaire indirect équipé d'un appoint conventionnel et fonctionnant en convection forcée, schématisé par la figure (V.1), a été modélisé afin de programmer un code de calcul permettant de simuler son comportement par rapport au produit à sécher ainsi que de mener une analyse de sensibilité global du modèle ainsi établi.

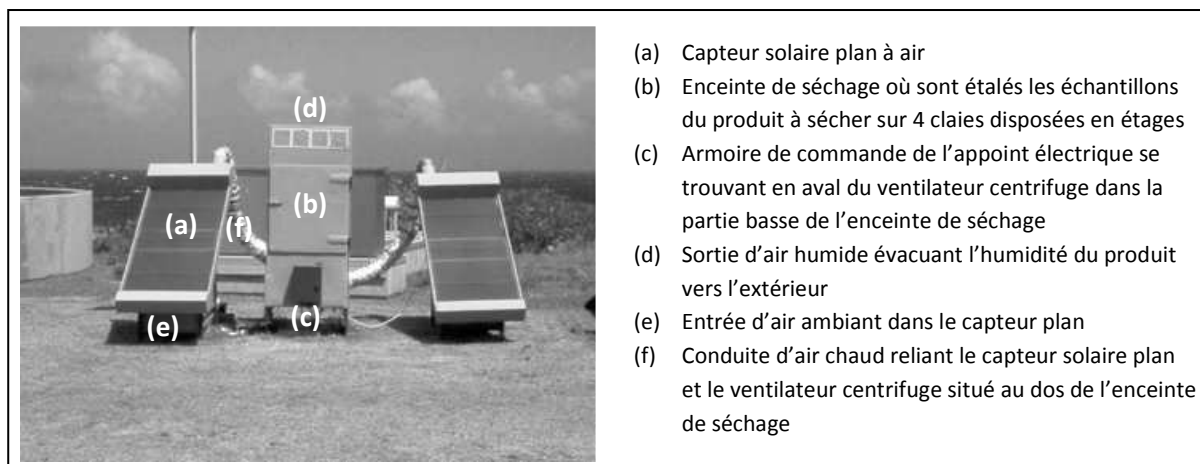


Fig. V.1. Photographie du système de séchage modélisé et utilisé pour l'expérimentation menée à l'intérieur d'une station d'épuration (Saint Pierre – La Réunion)

La modélisation de ce système ainsi que la méthode FAST utilisée pour l'analyse de sensibilité globale étant détaillées dans ma thèse [1] et dans notre publication [17], la figure (V.2) montre les paramètres les plus influents du modèle associé à l'enceinte de séchage seul.

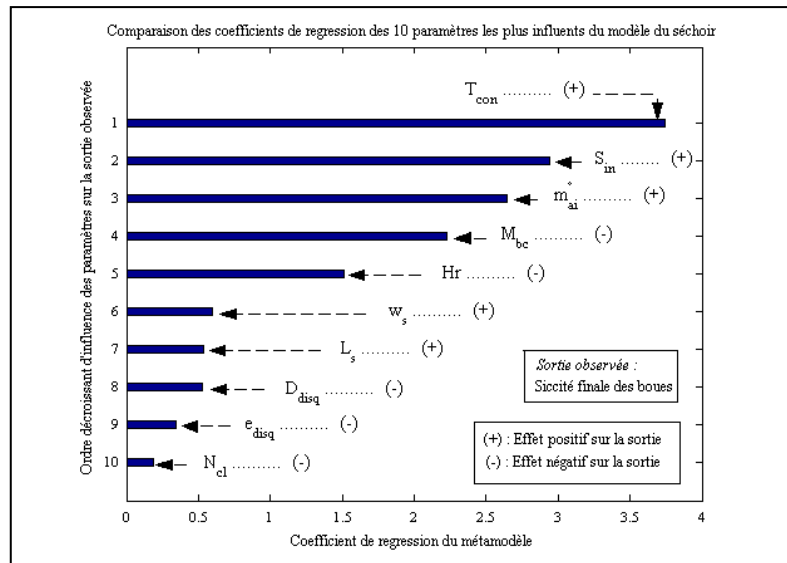


Fig. V.2. Ordre de prépondérance des paramètres les plus influents du modèle associé à l'enceinte de séchage seul

Au vu de cette récapitulation graphique, nous pouvons dégager les suivants :

- Les sens des effets linéaires des 10 paramètres les plus influents sur la sortie du modèle respectent bien les sens physiques antérieurement prouvés par de nombreux travaux sur le séchage [89] ;
- La température de consigne de l'air asséchant T_{con} est le paramètre le plus influent sur la siccité finale des boues ;
- A part les solutions banales consistant à augmenter la siccité initiale S_{in} et à diminuer la masse initiale M_{bc} des boues ainsi qu'à réduire aussi petite que possible l'épaisseur e_{disq} et le diamètre D_{disq} de chaque échantillon du produit à sécher, les trois facteurs essentiels de l'amélioration de la performance de l'enceinte de séchage sont la température T_{con} (effet positif), le débit m_{ai} (effet positif) et l'humidité relative Hr (effet négatif) de l'air asséchant ; il est à noter que la température et le débit de l'air asséchant sont des paramètres parfaitement contrôlables ;
- Il serait plus bénéfique d'avoir moins de claies (effet négatif de leur nombre N_{cl}) et d'élargir la section droite de l'enceinte de séchage (effets positifs de la largeur w_s et longueur L_s de cette enceinte).

L'étude expérimentale de la cinétique de séchage des boues des stations d'épurations a été conduite en utilisant le système de séchage illustré sur la figure (V.1). Chaque échantillon de forme cylindrique d'épaisseur 1 (cm) et de diamètre de base 6 (cm), a été caractérisé par une masse sèche de 1,67 (g/L), et une masse de matière volatile de 1,38 (g/L). Quant à l'air asséchant, sa température à la consigne de l'enceinte de séchage a été de 60 (°C) tandis que ses humidités relatives à l'entrée et à la sortie de cette enceinte ont été respectivement de 20% et de 60%.

Les échantillons du produit à sécher ont été étalés sur les 4 claies lesquelles ont été superposées et équidistantes verticalement de 25 (cm). Ces claies ont également été numérotées de 1 à 4 dans le sens ascendant et ont supporté initialement 24 (kg) de boues (6kg / claie).

Comme nous pouvons noter sur la figure (V.3), la puissance évaporatoire de l'air asséchant diminue au fur et à mesure qu'il passe d'une claie à l'autre (dans le sens ascendant) du fait qu'à la sortie d'une claie cet air asséchant est saturé humidité et ne peut que passer sur les claies suivantes tant que les échantillons de la claie inférieure ne se déshydratent suffisamment. De plus, les boues des stations d'épuration faisant partie des produits hygroscopiques, il existe 2 humidités critiques séparant les trois phases de vitesse de séchage de ce produit, à savoir : la phase à vitesse constante de déshydratation et les deux phases de décroissance de la vitesse de séchage.

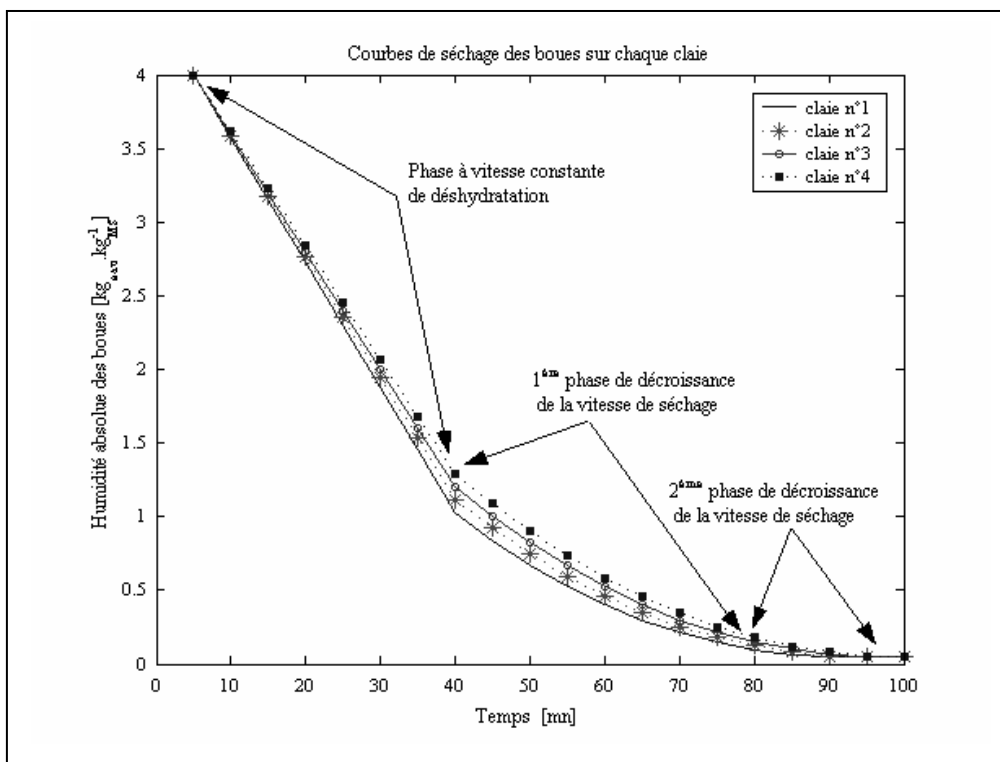


Fig. V.3. Courbe de séchage des boues sur chaque claie

Cette étude expérimentale a permis de déterminer les valeurs de ces deux humidités absolues critiques des boues telles que :

$$W_{crit1} = 3 \text{ kg}_{eau}/\text{kg}_{masse_sèche}$$

$$W_{crit2} = 1,1 \text{ kg}_{eau}/\text{kg}_{masse_sèche}$$

Cependant, il a été dégagé dans cette étude que les valeurs de 2 humidités absolues critiques peuvent différer d'un teste à l'autre étant donné qu'elles dépendent non seulement de la siccité initiale du produit mais aussi de la taille de chaque échantillon.

V.1.2. Modélisation d'un séchoir-serre pour le séchage en couche des boues des stations d'épuration

Le mode de séchage utilisé dans la section précédente est « indirect » tandis que la présente étude concerne le séchage solaire « direct ». Cependant, contrairement au traditionnel séchage à l'air libre, le procédé de séchage appliqué ici cherche à chauffer l'air asséchant par effet de serre lors de son passage au sein du séchoir-serre. En effet, en pratiquant deux ouvertures dénivelées sur les parois de la serre, l'air ambiant peut circuler de bas en haut au sein du séchoir du fait du mouvement ascendant des fluides chauds caractérisant le phénomène de convection naturelle ayant lieu au sein d'une enceinte close ou quasi-close. L'air ainsi chauffé devient asséchant et peut être mis en contact avec le produit à sécher lequel est généralement étalé en couche mince sur le sol de la serre (Figure (V.4)).

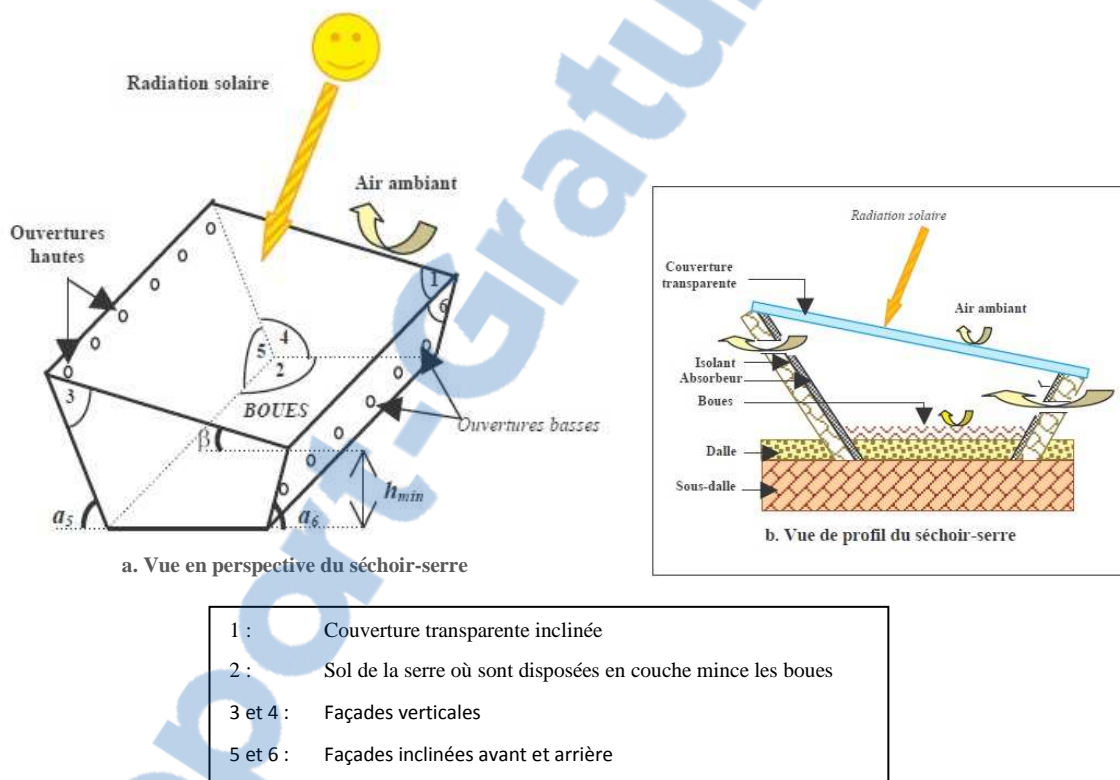


Fig. V.4. Schémas descriptifs du séchoir-serre étudié

Ainsi, cette configuration de séchoir-serre pour boues des stations d'épuration a été étudiée afin de proposer un outil d'aide à la conception de ce type de système de séchage. Le modèle associé à ce système de séchage est détaillé dans ma thèse [1] et notre publication [16]. Basé sur le modèle susmentionné, un code de calcul permettant l'étude théorique du comportement de ce système énergétique passif vis-à-vis du produit à sécher en son sein a été développé. Les résultats saillants des simulations peuvent se résumer de la manière suivante : il est préférable d'élargir la serre suivant sa longueur plutôt que sa largeur, les ouvertures dénivelées assurant la ventilation au sein de la serre admettent aussi des valeurs optimales qui dépendent de la vitesse moyenne du vent ; la durée de l'opération tend à se prolonger considérablement lorsque les ouvertures de ventilation sont orientées perpendiculairement à la direction du vent.

V.2. Etude théorique et expérimentale de la méthanisation des boues des stations d'épuration

Pour l'étude théorique de la méthanisation des boues des stations d'épuration, nous avons opté pour le modèle proposé par Bernard *et al.* [100]. En effet, il s'agit d'un modèle dynamique permettant le contrôle et suivi de la stabilité du procédé de digestion anaérobie des divers déchets liquides fermentescibles et dont le développement a visé à simplifier l'abstraction mathématique du procédé de méthanisation, c'est-à-dire, ses paramètres sont non seulement peu nombreux mais aussi identifiables à partir des grandeurs actuellement accessibles expérimentalement sans trop de difficulté. En effet, pour un déchet liquide fermentescible donné, ce modèle peut être utilisé si nous disposons des données sur la demande chimique en oxygène (DCO), la concentration des acides gras volatiles (AGV), l'alcalinité totale, la concentration du carbone inorganique total, le pH, le débit du biogaz produit ainsi que le pourcentage des composants de ce dernier.

Cette étude théorique a pour but d'effectuer l'analyse de sensibilité paramétrique globale du modèle susmentionné, présenté en détails dans [1, 19, 20, 99, 100], afin d'identifier les paramètres les plus influents de ce procédé.

Ainsi, il découle des résultats de cette analyse de sensibilité globale menée avec la méthode FAST que le taux de dilution qui est un paramètre aisément contrôlable est le plus influent sur la production du méthane ; il y a diminution de cette production au cas où la fraction de biomasse se détachant de leur support au sein de la phase liquide est grande ; la méthanisation est d'autant plus efficace que l'influent est riche en AGV ; enfin, les facteurs d'inhibition sont moins influents par rapport à ceux liés à la production de méthane ; les figures illustrant ces résultats étant présentées dans notre publication [19].

Après cette étude théorique, des mesures expérimentales ont été menées au niveau d'un biodigester continu mésophile dans le dessein de caractériser les matières convectées durant le procédé de fermentation anaérobie. Plus précisément, il s'agit de réaliser des analyses du type physique (température, masse sèche, matière volatile) et physico-chimique ainsi que biochimique (pH, demande chimique en oxygène (DCO), demande biochimique en oxygène (DBO₅), ammoniacque et les formes oxygénées). Pour ce faire, le dispositif expérimental est composé de 3 principaux éléments suivants (figure (V.5)):

- (a) Un module biodigester comprenant une plus grande cuve cylindrique, de 28 (cm) de diamètre et de 30 (cm) de hauteur, dans lequel est plongée en bain thermostatique d'une température de 35 (°C), une bonne partie du bioréacteur constitué d'une plus petite cuve de 24 (cm) de diamètre et de 32 (cm) de hauteur, dont le volume utile est donc de 13,6 litres ; l'étanchéité de ce module doit être assurée pour éviter toute fuite de gaz ; de plus, un dispositif automatisé de remuement est installé au sein du bioréacteur afin de mélanger continuellement le substrat et d'éviter ainsi la formation des poches acides lesquelles constituent des facteurs d'inhibition du processus de fermentation anaérobie.
- (b) Un module calorimètre lequel est placé en amont du module biodigester pour alimenter en eau chaude d'une température de 35 (°C) la zone annulaire de celui-ci.
- (c) Un module gazomètre dont la lecture se base sur le volume d'eau déplacée.

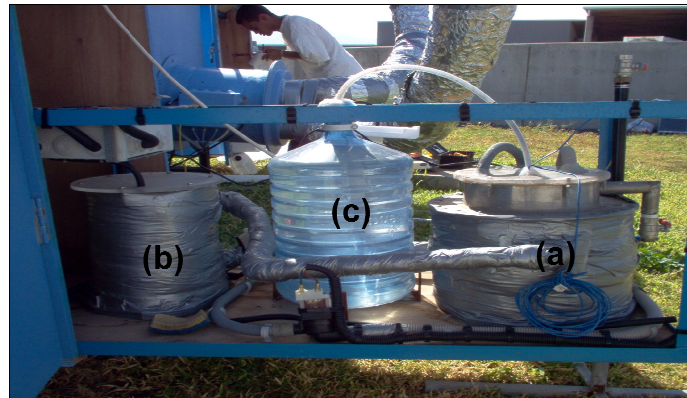


Fig. V.5. Photographie du dispositif expérimental de méthanisation [20, 99]

Il découle de cette première étape de mesure expérimentale conduite notamment par Morau [99] au Laboratoire PIMENT de l'Université de La Réunion, les résultats suivants : bien que les allures des courbes théoriques obtenues avec le modèle de Bernard *et al.* [100] épousent bien celles des courbes expérimentales, le modèle considéré sous-évalue les valeurs des DCO et des matières volatiles tandis qu'il surestime le volume du biogaz produit. Conséquemment, il importe d'effectuer plus de recalages expérimentaux de ce modèle ou d'en adopter un autre. Plus tard, Morau a mené d'autres campagnes de mesures expérimentales dont les résultats sont présentés dans sa thèse [99].

Partie 2 :

BILAN ET PERSPECTIVES

Volet VI : BILAN DE MES ACTIVITES D'ENCADREMENT DE TRAVAUX DE RECHERCHE VU SOUS L'ANGLE DE LA REUSSITE ACADEMIQUE OU DE L'INSERTION PROFESSIONNELLE DE MES EX-ENCADRES

Volet VII : PERSPECTIVES ET PROJETS DE RECHERCHE

Volet VI :**BILAN DE MES ACTIVITES D'ENCADREMENT DE TRAVAUX DE RECHERCHE VU SOUS L'ANGLE DE LA REUSSITE ACADEMIQUE OU DE L'INSERTION PROFESSIONNELLE DE MES EX-ENCADRES****VI.1. Introduction**

En ajoutant aux 11 étudiants de DEA, que j'ai encadrés avec succès au Département de Physique (option Energétique) de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, les 20 étudiants encadrés dans le cadre de la Formation de Master professionnel (en Génie civil, génie d'Energétique et de l'Environnement) organisée par l'Université de La Réunion à l'IST Antananarivo, mes ex-encadrés ayant réussi à présenter un mémoire de DEA/Master se comptent en tout, jusqu'au moment de la rédaction du présent document, au nombre de 31 étudiants. Il est à noter que 2 d'entre eux, Andriamamonjy [27] et Rajaonahy [28], sont parvenus à suivre successivement les deux formations susmentionnées.

Le présent bilan est dressé sur la base des résultats d'une enquête lancée par e-mail à chacun de mes ex-encadrés en DEA/Master.

VI.2. Productions scientifiques de mes ex-encadrés en DEA/Master

Il n'est pas évident pour un étudiant préparant un mémoire de DEA/Master de publier un article dans un congrès ou une revue à audience internationale et aucun texte régissant l'enseignement supérieur malgache ne contraint l'impétrant de le faire. Cependant, la chance de ce dernier d'obtenir, quelques mois après l'obtention de son diplôme de DEA/Master, une bourse de mobilité doctorale à l'étranger dépend notamment du nombre de ses publications internationales. Par conséquent, mes étudiants de DEA/Master sont toujours encouragés de faire des publications scientifiques tout de suite après la présentation de leur mémoire de DEA/Master.

Ainsi, à mon humble avis, le premier indicateur de réussite académique de mes ex-encadrés en DEA/Master est le nombre de publications qu'ils ont pu réaliser suite aux travaux de préparation de leurs mémoires respectifs.

La figure (VI.1) montre que plus de 28% (09 sur 31) de mes ex-encadrés en DEA/Master possèdent au moins une publication internationale à la suite de leurs travaux de DEA/Master. Plus précisément, cinq d'entre eux ont une publication, deux en possèdent deux tandis que deux autres disposent plus de deux publications telles que 6 pour Andriamamonjy [27] et 4 pour Rajaonahy [28]. Ainsi, 22 sur 31 étudiants n'ont pas fait de publication. Toutefois, il convient de rappeler que la Formation de Master délocalisée à l'IST Antananarivo est notamment une formation à vocation professionnelle plutôt que par la recherche. La plupart de ces 22 étudiants sont en fait de la Formation de Master délocalisée et se sont surtout souciés de leur insertion professionnelle plutôt que de la poursuite doctorale de leur cursus académique.

En conséquence, si nous nous intéressons uniquement au cas des 11 étudiants de DEA de Physique Energétique pour mieux évaluer ma compétence en termes d'encadrement de travaux de recherche scientifique, nous pouvons dégager les résultats suivants : trois d'entre eux ont produit une publication scientifique, un autre en possède 2 et, avons-nous vu précédemment, deux autres [27,28] disposent d'un nombre de publications supérieur à 2. En tout, ils sont 6 sur 11 étudiants, c'est-à-dire 54% (voir figure (VI.2)), à avoir réussi à publier un article scientifique à la suite de leurs

mémoires de DEA. Il est à noter que trois des cinq autres ex-encadrés de DEA n'ayant pas publié sont encore, au moment de la rédaction du présent document, en train de finaliser leurs manuscrits à soumettre à des revues scientifiques à audience internationale ; tandis que deux d'entre eux, nous verrons les statistiques relatives à l'insertion professionnelle plus loin, comptent parmi les ex-encadrés ayant des emplois stables.

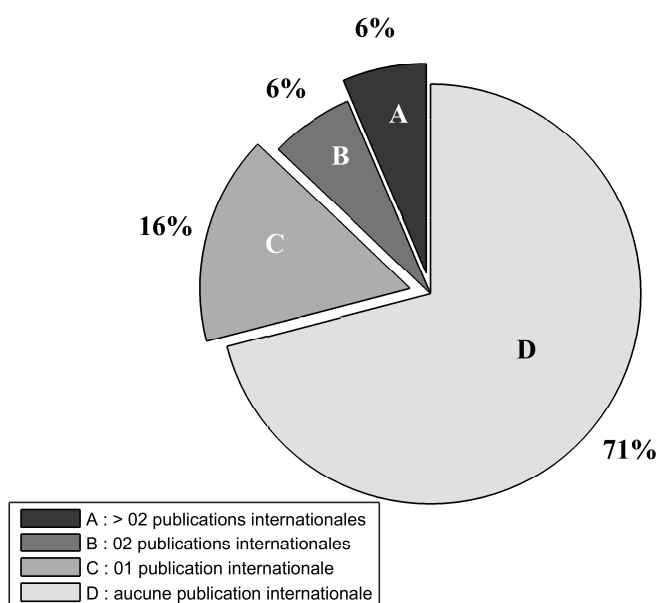


Fig. VI.1. Synthèse des productions scientifiques de mes 31 ex-encadrés de DEA/Master dans les deux formations confondues

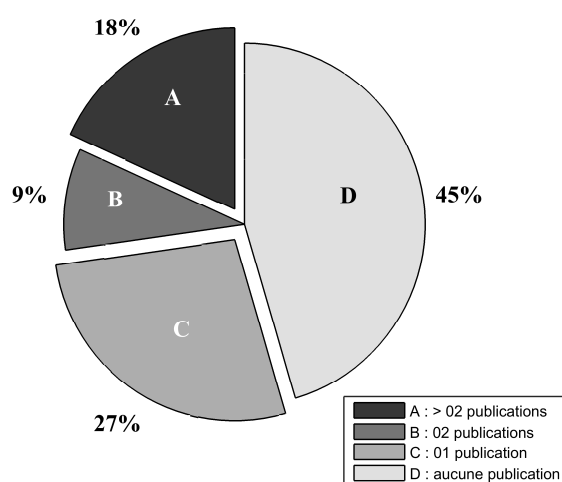


Fig. VI.2. Synthèse des productions scientifiques de mes 11 ex-encadrés de DEA

VI.3. Autres indicateurs montrant les capacités de mes ex-encadrés en DEA

Outre la production des articles scientifiques, un autre indicateur de succès d'un ex-encadré en DEA est le fait d'être accepté à poursuivre une étude doctorale. En effet, ce ne sont pas tous les titulaires de DEA/Master qui sont autorisés à s'inscrire dans une Ecole Doctorale bien que le parcours de DEA/Master d'Energétique dans lequel j'interviens vise à former des jeunes futurs chercheurs susceptibles de mener à bien une étude doctorale.

Comme nous pouvons constater sur la figure (VI.3), seuls 2 des 11 (18%) ex-encadrés en DEA n'ont pas souhaité poursuivre leur étude en thèse mais possèdent toutefois des emplois stables actuellement (l'un travaille à l'Institut National de Formation Pédagogique à Mahamasina Antananarivo et l'autre occupe un poste de cadre au sein d'un ONG de développement à Antsirabe). Les 9 restants (82%) ont donc opté à faire des études doctorales, tels que deux d'entre eux ont déjà soutenu leurs thèses de doctorat, un est en phase de finalisation de sa thèse, trois sont en 2^{ème} année de thèse et trois autres se sont récemment inscrits en 1^{ère} année de thèse.

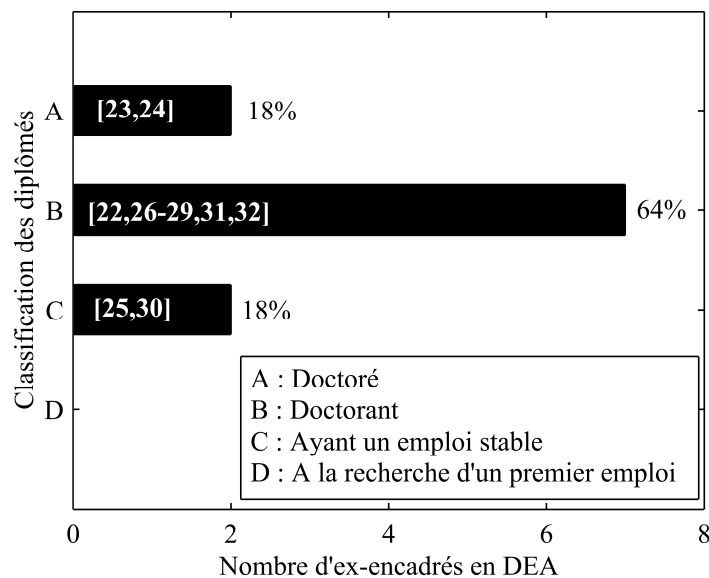


Fig. VI.3. Suites des cursus académiques de mes ex-encadrés en DEA

Par ailleurs, le fait d'être sélectionnés pour bénéficier d'une bourse de mobilité à l'étranger dans le cadre de la préparation d'une thèse peut également constituer un autre indicateur de réussite de mes ex-encadrés en DEA. Par extension, une lettre ou une attestation d'accueil émanant d'un directeur de laboratoire à l'étranger en vue d'appuyer la candidature d'un doctorant à une offre de bourse de mobilité, peut aussi être interprétée comme la reconnaissance du potentiel de ce doctorant. Comme nous pouvons voir sur la figure (VI.4), parmi mes onze ex-encadrés en DEA :

- quatre ont été sélectionnés pour bénéficier des bourses entières (3 ans) de préparation de leurs thèses à l'étranger (deux en Afrique du Sud, un en France (Toulouse) et un autre en Belgique) ;
- deux font partie des cinq doctorants malgaches, dans le domaine de sciences et technologies, bénéficiaires de bourses de mobilité de trois mois dans leurs laboratoires

d'accueil respectifs pour l'année 2016, tels que Rajaonahy [28] ira au LBE de l'INRA de Narbonne tandis que Rakotoarisoa [29] séjournera au LAMPS-GEM de l'Université de Perpignan (France).

- cinq n'ont encore bénéficié ni de lettre d'accueil ni de bourse de mobilité doctorale ; il convient de noter que l'un d'eux [24] a pourtant pu brillamment finaliser et soutenir sa thèse [57] (co-auteur de la publication [11]), deux d'entre eux [31,32] sont encore en 1^{ère} année de thèse et auront encore la chance, si besoin est, de candidater à une offre de bourse de mobilité à l'étranger, tandis que les deux ex-encadrés restants [25,30] sont ceux qui, avons-nous vu plus haut, se sont arrêtés après l'obtention du DEA pour s'intégrer directement dans le milieu professionnel.

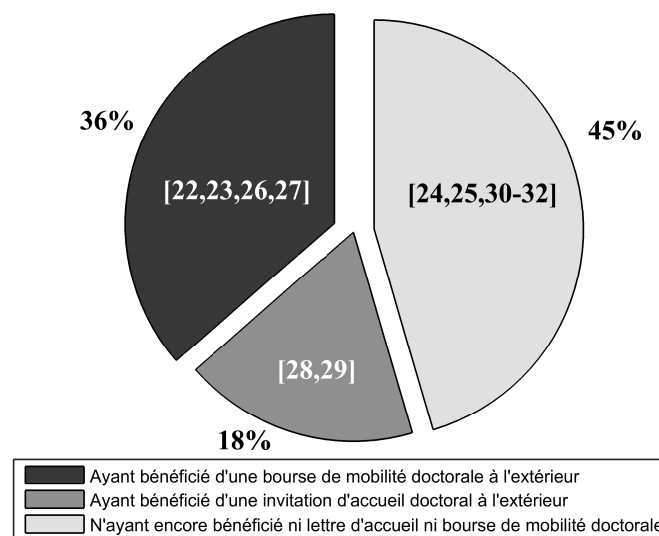


Fig. V.4. Reconnaissance internationale des capacités de mes ex-encadrés en DEA

Il convient de noter qu'à part Andriamamonjy [27] qui a été major de sa promotion lors de l'année d'étude théorique sanctionnée par une Attestation d'Etudes Approfondies (AEA) précédant la période de préparation du mémoire de DEA, les rangs en AEA de mes ex-encadrés en DEA n'ont pas toujours été inférieurs à 3. Autrement dit, j'ai encadré avec succès non seulement les meilleurs de leurs promotions mais aussi ceux qui ont été classés moins bons en AEA. A titre d'exemple, Andriamamonjy [27], Rajaonahy [28] et Rakotoarisoa [29] ont été respectivement classés 1^{er}, 5^{ème} et 14^{ème} de la promotion AEA d'Energétique 2011.

VI.4. Bilan des occupations de mes ex-encadrés suite à l'obtention de leurs diplômes

D'une part, l'obtention d'un emploi stable impliquerait pour un titulaire de DEA ou de Master l'abandon de la poursuite de ses études post DEA/Master à moins d'être recruté dans une institution d'enseignement supérieur ou dans un centre de recherche scientifique. De plus, il arrive souvent qu'un résultat moins bon en DEA/Master ne permet plus à l'impétrant d'avoir d'autre option que la recherche d'emploi.

D'autre part, la conduite d'un projet scientifique pour la préparation d'une thèse de Doctorat repousse d'au moins 3 ans l'échéance de l'intégration du doctorant dans le milieu professionnel alors que l'obtention d'un poste d'enseignant-chercheur ou de chercheur-enseignant à l'issue de cette thèse est quasiment incertaine. A part le souhait d'obtenir le titre de Docteur, diverses raisons motivent les jeunes diplômés de DEA/Master à se lancer dans l'aventure doctorale en dépit de ce risque. La première raison serait leurs jeunes âges, compris entre 22 et 25 ans, lesquels constituent non seulement un important atout dans la réalisation d'un quelconque projet de thèse mais leur permettent aussi de patienter encore quelques années avant de se jeter dans les champs du travail. Les autres motivations d'intégrer l'école doctorale peuvent être purement matérielles dont l'obtention d'une bourse de mobilité à l'étranger. En effet, les histoires à succès des aînés attributaires de bourses extérieures, tels que Andrianomena [22], Ratovoson [23], Rafieferantsoa [26] et notamment Andriamamonjy [27] lequel touche actuellement une bourse doctorale mensuelle de € 2400 sur une période de 48 mois en Belgique après avoir été sélectionné parmi une cinquantaine de concurrents mondiaux, font rêver plusieurs étudiants aussi bien ceux de la formation de DEA/Master du parcours Energétique que ceux de la formation de Master délocalisée. Compte tenu du contexte socio-économique du pays, il est clair que si les doctorants boursiers susmentionnés ont opté pour l'insertion professionnelle tout de suite après l'obtention de leurs diplômes de DEA/Master, ils n'auraient pas pu épargner l'équivalent de ce qu'ils ont économisé durant les périodes de réalisation de leurs thèses.

Bien que la réussite académique et le succès à l'insertion professionnelle puissent paraître diamétralement opposés, le bilan des occupations post DEA/Master de mes ex-encadrés est présenté sur la figure (VI.5) en précisant que le seul indicateur d'échec adopté dans la présente analyse est le taux de chômage de mes ex-encadrés relatif à la période post DEA/Master (excluant ainsi l'éventuelle période post doctorale).

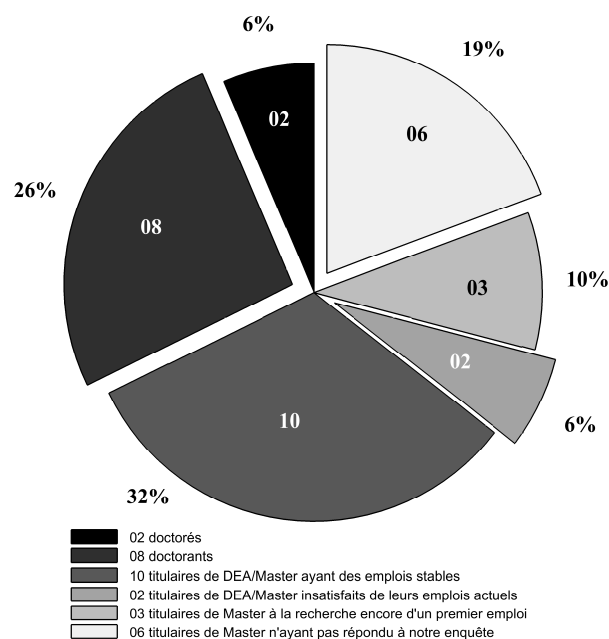


Fig. V.5. Occupations post DEA/Master de mes ex-encadrés

Comme nous pouvons voir sur cette figure, les 2 docteurs, les 8 doctorants et les 10 ex-encadrés ayant des emplois stables, représentent un peu plus de 64% de mes 31 ex-encadrés DEA/Master et peuvent être classés dans le groupe des étudiants qui ont su mettre en pratique ce qu'ils ont reçu de l'une des deux formations de DEA/Master mentionnées tout au long du présent document. Même si, parmi les 6 étudiants qui n'ont pas répondu à notre enquête, figurent certains étudiants venant juste de terminer leur étude de Master (vers mi novembre 2015), peu avant le lancement de l'enquête auprès de mes ex-encadrés, nous pouvons les considérer tous, pour assurer une bonne objectivité de la présente analyse, comme étant également à la recherche d'un premier emploi à l'instar des 3 autres ex-encadrés Master qui ont directement déclaré être dans cet état présentement. En ajoutant à ces 9 ex-encadrés Master « en état de chômage » les 2 autres ex-encadrés exerçant des emplois insatisfaisants, nous avons donc 11 sur 31 ex-encadrés (un peu moins de 36%) qui éprouvent des difficultés à capitaliser les connaissances acquises au cours de la formation de Master délocalisée. Néanmoins, 64% de taux de réussite de mes ex-encadrés est un chiffre que je peux brandir haut avec une grande fierté. Par ailleurs, ce taux de réussite est nettement amélioré si nous nous limitons uniquement au cas des ex-encadrés issus de la Formation de DEA/Master du parcours Energétique pour mieux évaluer ma capacité d'encadrement des recherches. En effet, nous avons vu sur la figure (VI.3) que 9 sur 11 ex-encadrés en DEA (82%) ont su valoriser leurs acquis pour s'inscrire à l'Ecole Doctorale et mener à bien ultérieurement leurs projets de thèse, comme deux d'entre eux [23,24] l'ont déjà prouvé.

Il convient de noter que le nombre de mes ex-encadrés qui préparent actuellement leurs thèses devient 8 sur la figure (VI.5) alors que nous en avons compté 7 sur la figure (VI.3). Le 8^{ème} doctorant est en effet issu de la formation de Master délocalisée. Il s'agit de Nambinintsoa [47] qui a fait un travail remarquable lors de la préparation de son mémoire de Master et qui a été encouragé à poursuivre ses études pour mener des travaux de thèse. Notons également que j'assure aussi la codirection scientifique des travaux de 2 autres doctorants, Mamy Harimisa Radanielina (inscrit à l'Université d'Antananarivo et déjà co-auteur des publications [7,8,13]) et Vanessa Rolande Rakotoson (inscrite à l'Université de La Réunion), qui ont pareillement produit d'excellents travaux de mémoires de Master sous l'encadrement d'un collègue intervenant dans cette formation de Master délocalisée laquelle, rappelons-le encore, est notamment à visée professionnelle.

VI.5. Résultats de l'encadrement des étudiants de la formation Master du parcours Energétique

Tout au long de ce Volet VI, il a été toujours question d'encadrement en DEA pour mentionner les résultats relatifs à la formation DEA/Master du parcours Energétique au niveau de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo. En effet, l'application du système LMD (Licence-Master-Doctorat) au niveau de l'Université d'Antananarivo est entrée en vigueur depuis l'entame de l'année universitaire 2013-2014. En particulier, la date limite de présentation publique d'un mémoire de DEA à la Faculté des Sciences a été fixée au 30 avril 2015.

Ainsi, il m'a été confié l'encadrement des travaux de 3 étudiants en vue de la préparation de leurs mémoires de Master du parcours Energétique de la Mention Physique et Applications où je suis affilié. Comme résultat de cette première expérience d'encadrement sous le régime du système LMD à l'Université d'Antananarivo, Razanajatovo [54] qui est un des 3 étudiants susmentionnés est, au moment de l'achèvement de la rédaction du présent document, en train de remplir les paperasses administratives lui permettant de faire la présentation de son mémoire devant un jury d'examen

dans le courant du mois d'avril 2016. Ledit mémoire [54] n'a pas été pris en compte pour le bilan d'activités d'encadrement de DEA/Master discuté précédemment. Quant aux deux autres étudiants, l'une d'entre eux n'a donné aucune nouvelle depuis longtemps alors que l'autre m'a régulièrement fait des rapports d'avancement de ses travaux et a dernièrement été autorisé également à finir la rédaction de son mémoire dont la présentation devant une commission d'examen, devraient se faire, espérons-le, avant le 30 juin 2016.

Une explication à ce résultat légèrement mitigé est que j'ai donné une liste de sujets de recherche sans savoir les rangs en S9 des 3 étudiants qui, a posteriori, les ont choisis. En effet, chacun de ces sujets de recherche proposés, tout à fait traitable en 6 mois par un étudiant sérieux et déterminé, a été formulé dans un double dessein : que l'étudiant obtienne son diplôme de Master et puisse publier un article scientifique. Mais sous une condition de travail qui n'est pas toujours meilleure à Madagascar, le délai de réalisation du mémoire peut dépasser la durée de 6 mois initialement prévue. Dans ce cas, même si certains des 3 étudiants susmentionnés réussissent à achever leurs mémoires, ils sont pénalisés par le décalage de la présentation de leurs mémoires devant un jury d'examen car ils ont raté l'entrée en Ecole Doctorale pour l'année universitaire en cours et, de ce fait, doivent encore patienter quelques mois pour pouvoir effectuer une préinscription pour la prochaine année universitaire.

Notons donc au passage que, le système LMD étant centré sur l'apprenant, encadrer des mémoires de Master permettant de produire des publications scientifiques tout en évitant de pénaliser les étudiants en termes de temps de réalisation de leurs mémoires, représente un exercice très compliqué pour un enseignant-chercheur souhaitant préparer un mémoire de HDR. Désormais, à mon humble avis, un maître de conférences ambitionnant d'accéder au rang de professeur d'Université malgache ne devrait plus se contenter uniquement de l'encadrement d'un certain nombre de mémoires de Master mais a intérêt à négocier avec un collègue de rang magistral de son équipe de recherche pour la codirection scientifique d'une ou deux thèses afin d'éviter de faire une thèse bis à cet effet.

Par ailleurs, pour la promotion de S10 du parcours Energétique de l'année universitaire en cours (2015-2016), deux autres étudiants font également leurs travaux de mémoire de Master sous mon encadrement. Au rythme de leurs rapports périodiques et à la lumière des contenus de ceux-ci, nous pouvons espérer qu'ils présenteront leurs mémoires de Master au plus tard le 31 juillet 2016. Ensuite, un certain nombre de nouvelles publications scientifiques renfloueront conséquemment la liste des productions scientifiques de mon équipe de recherche pour l'année 2016.

VI.6. Conclusion

Hormis Razanajatovo [54], à tous mes 31 ex-encadrés, dont 11 sont issus de la formation DEA/Master du parcours Energétique de la Faculté des Sciences d'Antananarivo et 20 ont suivi la formation de Master délocalisée à l'IST Antananarivo, il a été envoyé par e-mail la simple requête d'information suivante : « *Pourriez vous SVP, me donner, par simple retour du présent courriel, une information sur votre situation actuelle en termes d'insertion professionnelle ou de poursuite d'étude académique à la suite de la formation pour laquelle nous étions amenés à travailler ensemble pour la préparation de vos mémoires respectifs de DEA ou de Master?* »

Les 25 réponses reçues m'ont permis de dresser un bilan largement positif mettant en exergue ma capacité non seulement de diriger des recherches fructueuses mais aussi de former des cadres supérieurs opérationnels répondant aux besoins du secteur productif pour le développement du pays.

Volet VII : PERSPECTIVES ET PROJETS DE RECHERCHE

VII.1. Introduction

Pour établir les perspectives de mes projets de recherche, les faits suivants ont été pris en considération :

- Le domaine de recherche sur l'énergie renouvelable est très vaste ; de ce fait, les propositions de sujets de recherche devraient s'inscrire dans le cadre d'un certain nombre de thématiques prioritaires dans ce domaine et prendre en compte les limites des ressources matérielles et humaines disponibles dans notre laboratoire.
- En dépit des limites des moyens locaux susmentionnées, il y a aussi de nombreux moyens internationaux mobilisables par le biais de la collaboration internationale (ex : fonds compétitif de la recherche, appels à projets, etc.).
- La devise de l'Université d'Antananarivo étant « *Insensé celui qui ne fait pas mieux que son père* » ; le poseur de sujet de recherche ou l'encadreur ne devrait pas nécessairement être un(e) expert(e) ayant une connaissance ou expertise pointue sur le thème à traiter ; il appartient à l'étudiant encadré de le devenir par tous les moyens, dont l'Internet par exemple, tout en évitant de recourir au plagiat.
- Les propositions de sujet de recherche devraient s'inscrire dans le cadre de la résolution de la problématique de la transition énergétique au sens large tout en apportant une certaine innovation. Autant que faire ce peut, le choix de l'approche relative à leur réalisation est souple, dans le temps, pour permettre la saisie des éventuelles opportunités (obtention de subvention, partenariat avec les acteurs productifs, collaboration scientifique, etc.) présentes au moment de l'entame ou au cours de la mise en œuvre de chaque projet.

Ainsi, je souhaiterais particulièrement diriger des travaux de préparation de mémoire de Master ou de thèse suivant les deux axes principaux ci-après :

- Le génie énergétique et de l'environnement (énergie renouvelable, efficacité énergétique dans l'habitat, valorisation énergétique des déchets, analyse de cycle de vie des systèmes énergétiques, etc.),
- La planification et la politique énergétique (systèmes et réseaux énergétiques intelligents ou smart grids, modélisation de la politique énergétique du pays, mise au point d'outils d'aide à la décision sur le système énergétique national, etc.).

Alors que le premier axe regroupe un certain nombre de thèmes habituellement traités dans notre laboratoire, le deuxième axe constitue une réorientation partielle de mes activités de recherche dans la mesure où cet axe de recherche n'est pas encore suffisamment exploré au niveau universitaire à Madagascar.

En fait, j'aurais voulu faire une réorientation complète dans ce deuxième axe de recherche. Cependant, deux difficultés majeures se posent. D'une part, la recherche scientifique sur le thème de la planification et de la politique énergétiques à Madagascar est spécifique à la Grande île et, de ce fait, intéresse moins les institutions de recherche partenaires étrangers, ce qui réduit la chance pour nouer des collaborations scientifiques internationales sur ce thème. D'autre part, les financements

locaux de la recherche scientifique sont trop faibles, voire inexistant dans certains secteurs de la recherche. Certes, il y a des financements du type bourse de mobilité à l'étranger mais il n'y a quasiment aucune chance d'en décrocher une sans une attestation d'accueil d'un membre de mon équipe de recherche dans un laboratoire partenaire étranger. Au passage, il convient de noter que l'obtention d'une bourse de mobilité, disons d'une durée de 3 mois en Europe par exemple, aurait permis à son bénéficiaire, non seulement d'acquérir des nouvelles connaissances scientifiques échangées avec les membres de son laboratoire d'accueil mais aussi d'économiser une certaine somme en devise étrangère, de forte valeur par rapport à la monnaie locale, lui permettant d'assurer sa subsistance pour se concentrer uniquement à ses travaux de recherche pendant les 9 autres mois de l'année à Madagascar.

De ce qui précède, il importe que mon équipe de recherche montre, dans un premier temps, sa capacité à publier un certain nombre d'articles scientifiques portant sur le thème de la planification et de la politique énergétique, dans le dessein de bénéficier de quelconque financement sur ce thème. Pour ce faire, elle ne devra compter notamment que sur ses propres ressources matérielles et financières, bien que celles-ci soient très limitées, pendant une période pouvant aller jusqu'à une décennie, le temps d'acquérir une certaine notoriété scientifique par le biais des futures publications parues dans des revues scientifiques à impact factor respectable.

Par conséquent, miser uniquement sur ce deuxième axe de recherche court le haut risque de se retrouver avec une équipe de recherche « trop pauvre » qui, à la longue, finira par ne plus pouvoir intéresser les jeunes chercheurs potentiels ; d'où mon choix de la réorientation progressive dans ce domaine en le traitant parallèlement avec des sujets portant sur le thème du génie énergétique et de l'environnement lequel est susceptible d'attirer plus de financements, aussi bien locaux qu'internationaux, et par suite, permet de faire régulièrement davantage de publications afin d'assurer et d'améliorer durablement la visibilité des activités de mon équipe de recherche sur les scènes national et international.

Dans tous les cas, qu'il y ait financement ou non, il est grand temps que les énergéticiens malgaches apportent abondamment leurs contributions scientifiques respectives sur le thème de la planification et politique énergétique. Pour y contribuer, ma vision à moyen terme (d'ici 5 ans) est que l'équipe de recherche que j'aurai l'honneur de diriger aura publié au moins 5 publications scientifiques dans des revues à impact factor estimable sur le thème susmentionné. A plus long terme, ma vision de mon équipe de recherche est que celle-ci devienne une équipe universitaire de référence incontournable dont les expertises et/ou conseils peuvent bien satisfaire les attentes des autorités publiques, des acteurs de développement et des partenaires d'appuis financiers du pays, en vue de la prise des décisions importantes ayant lien avec la planification et la politique énergétique à Madagascar. De plus, même si notre avis ne sera pas pris en compte par les décideurs politiques, le fait qu'il y a des universitaires débattant ou discutant de manière scientifique de la planification et de la politique énergétique du pays, influera directement ou indirectement leurs conseillers énergétiques et leurs décisions dans ce domaine.

Dans ce qui suit, les perspectives sont classés suivant trois horizons temporels : à court, moyen et long termes.

VII.2. Perspectives à court terme

Il s'agit des travaux de recherche dont la durée de réalisation par des étudiants sérieux ne dépasse pas 6 mois. Ce sont donc des travaux à traiter normalement par les étudiants de Master dans le cadre de leur stage de préparation de mémoire.

VII.2.1. Compléments des travaux de DEA ou de Master non convertis encore en publication

Afin de mieux valoriser scientifiquement et/ou socio-économiquement un certain nombre de travaux réalisés dans le cadre de préparation de mémoires de DEA ou de Master, il serait plus bénéfique de les compléter par d'autres travaux de Master au cas où le sujet de recherche demeure encore d'actualité.

a) *Complément des travaux sur la mise au point de code de calcul numérique de facteur de forme géométrique entre deux surfaces finies en regard*

La connaissance du facteur de forme géométrique entre deux surfaces en regard est très utile dans le cas de l'étude de transfert thermique par rayonnement. En cas de géométries complexes des surfaces considérées, il arrive souvent que le chercheur soit amené à faire lui-même le calcul de ce paramètre à défaut de modèle mathématique utilisable à cet effet. Ainsi, l'étude menée par Ratovoson [23] avait pour objectif de mettre au point un outil de calcul numérique de facteur de forme. Pour ce faire, la méthode de conversion des intégrales doubles en intégrale de contour par application du théorème de Stokes suivi de calculs numériques d'intégrales a été utilisée.

La qualité et la quantité des travaux produits dans [23] n'étant pas remises en cause, nous nous sommes toutefois rendu compte ultérieurement que l'outil en question éprouve des difficultés lorsque les deux surfaces considérées possèdent une arête commune. En effet, la fonction intégrande n'est pas définie aux bornes de l'intégrale de contour relatif à cette arête commune. Il y a donc lieu de chercher une méthode plus robuste pour lever cette ambiguïté.

b) *Complément de travaux sur l'étude de la performance d'un séchoir serre à section droite triangulaire isocèle à faible coût*

Au préalable, Ahamadi [24] et Rakotoarisoa [29] ont mené des études théoriques de ce séchoir serre, lequel a été conçu de manière à faciliter son adoption par les agriculteurs malgaches et les paysans des pays en développement jouissant de l'abondance de l'ensoleillement. Ensuite, les travaux de Razafimandimby [31] consistent à faire des mesures expérimentales à l'aide de ce séchoir serre pour caractériser les paramètres de cinétique de séchage du paddy Rojomena 137 et des feuilles de manioc pilées. Pour mieux approfondir l'analyse de sa performance et montrer sa polyvalence à plusieurs types de produits, il serait plus avantageux d'effectuer, avec ce système de séchage solaire direct, d'autres campagnes de mesures pour d'autres produits agricoles tout en mettant au point un dispositif expérimental supplémentaire permettant la détermination des isothermes de désorption des produits considérés.

Concernant les propriétés thermophysiques de ce système de séchage, il serait intéressant aussi de mener une étude visant le recalage expérimental des modèles disponibles dans la littérature pour calculer la vitesse ou le débit d'écoulement naturel de l'air asséchant au sein du séchoir serre. Mon équipe de recherche peut également traiter un autre sujet qui porte

sur la détermination expérimentale du coefficient d'échange par convection naturelle entre les faces de la couverture transparente de ce séchoir serre avec respectivement l'air asséchant intérieur et l'air extérieur. La détermination d'un coefficient d'échange global combinant les phénomènes de convection et de rayonnement au niveau de cette couverture transparente constituerait également une autre option de sujet de recherche.

c) *Complément de l'étude d'impacts environnementaux de la ferme avicole d'Avitech*

En l'état, l'étude menée par Razanakoto [46] ne peut pas être publiée car elle ressemble aux nombreuses autres études d'impacts environnementaux (EIE) conduites un peu partout dans le monde. En revanche, si nous utilisons les données de cette étude et appliquons la méthode LMDI (Logarithmic Mean Divisia Index) pour l'analyse de décomposition des impacts, ce sera une grande première dans le domaine de l'EIE et les résultats seraient très intéressants.

d) *Complément de l'étude d'un système de production d'énergies à partir des résidus de bois*

Nambinintsoa [47], qui a modélisé la production de syngaz à l'aide du procédé de gazéification à lit fixe pour valoriser les résidus de bois de l'entreprise Tropical Wood, est en train de compléter lui-même ses travaux pour pouvoir en sortir une publication avant l'entame de ses travaux de thèse. Toutefois, il y a aussi d'autres aspects d'études que mon équipe peut mener sur ce thème. Par exemple, l'étude exergo-économique du système de conversion de l'énergie de la biomasse par le procédé de gazéification en énergie électrique intéresse directement l'entrepreneur pour pouvoir décider de la suite à donner à la proposition de mon équipe pour la mise en place d'un prototype de gazéificateur combiné avec un moteur et un alternateur, en vue de l'autoproduction d'électricité pour cette entreprise.

e) *Complément de la première modélisation de la planification énergétique à Madagascar*

Nous verrons plus loin que ce thème est très vaste car il est encore quasiment inexploré sur le plan de la recherche scientifique à Madagascar. Ainsi, les travaux à court terme ne suffiront pas pour mieux contribuer à la résolution des problématiques liées à la transition énergétique du pays. Néanmoins, l'étude effectuée par Rasamimanana [51] fait partie des premiers pas dans ce vaste domaine de recherche. Il a été constaté que l'outil Enegyplan 12.1 utilisé lors de cette investigation s'avère peu adapté au cas des pays en développement comme Madagascar où des nombreuses données statistiques sur les modes de consommation énergétique font défaut. En conséquence, pour une étude à court terme, il serait intéressant de lancer d'autres étudiants de Master sur ce même thème mais en réduisant l'étendue de l'étude à une région de Madagascar par exemple et en utilisant un autre outil d'analyse de planification requérant moins de données comme le modèle LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System [88]) par exemple.

VII.2.2. *Extension des travaux de DEA ou de Master convertis en publication*

f) *Extension des études sur la performance énergétique des toits verts*

En dépit des quatre travaux [26-28,40] déjà réalisés dans le domaine de l'étude des toitures végétalisées, il reste encore d'autres aspects d'études qui méritent d'être menés. Dans

l'immédiat et pour montrer la compétitivité de mon équipe par rapport aux autres équipes de recherche travaillant dans ce domaine, il importe impérativement d'entamer et de réaliser dans les meilleurs délais l'analyse de cycle de vie des toits verts. Les autres aspects seront discutés plus loin dans les perspectives à moyen et à long termes.

g) Amélioration de l'outil GoSAT

L'outil d'analyse de sensibilité globale GoSAT [2, 27], fonctionne uniquement au cas où le code de calcul associé au modèle étudié est programmé sous environnement Matlab. Il serait donc souhaitable qu'il puisse également traiter les codes de calcul programmé avec d'autres types de langages de programmation scientifique tels que C++, Fortran, Python, etc. Deux options plus faciles se présentent : si le langage de programmation du code considéré possède des fonctions équivalentes à celles utilisées dans GoSAT notamment pour l'analyse des transformées de Fourier alors il suffit de retranscrire le contenu de GoSAT sur cette plateforme de programmation ; la deuxième option consiste à renommer un extrait de la première partie de GoSAT qui permet de générer de façon automatique les entrées aléatoires de simulations et les sauvegarder sur un fichier tableur du type excel, ensuite effectuer le nombre de simulations nécessaires selon les critères de Shannon sur la plateforme de programmation avec laquelle a été programmé le code à étudier en supposant que celle-ci permet de lire et de restituer des données sous un tableur du type excel, enfin l'analyse spectrale automatisée des transformées de Fourier sera de nouveau faite sur Matlab en se servant du fichier tableur contenant les résultats de simulations. Plus précisément, dans cette deuxième option, le travail consiste donc à coder deux programmes Matlab dont le premier vise à générer les valeurs aléatoires des paramètres d'entrées correspondant au nombre des simulations à exécuter et le second servira à l'analyse de sensibilité globale proprement dite. En outre, une troisième possibilité consisterait à transformer GoSAT en un code exécutable d'extension (.exe) et la difficulté réside dans l'établissement du lien entre ce GoSAT exécutable (« standalone ») et le code de calcul à étudier ; cette troisième option relève surtout du travail d'un candidat ayant une connaissance plus poussée en informatique.

Il convient de noter que la quasi-totalité des contenus de GoSAT sont gracieusement données sous forme d'algorithmique en annexe de notre publication [2] laquelle est devenue, au moment de la phase finale de rédaction du présent document, l'article le plus téléchargé parmi tous les articles parus dans le même numéro que lui [2] et à ce rythme cet article est en bonne voie pour figurer parmi les articles les plus populaires du journal de sa parution, sans aucune prétention de notre part. Nous espérons donc que très prochainement d'autres codes équivalents à GoSAT seront également disponibles dans la littérature pour traiter d'analyse de sensibilité globale des codes programmés sur des plateformes autres que Matlab.

h) Etudes comparatives des divers modèles proposés dans la littérature à l'aide GoSAT

Avec la puissance de GoSAT [2, 27], mon équipe peut se permettre de mener des études comparatives des modèles disponibles dans la littérature sur un certain nombre de thèmes. Nous pouvons nous limiter par exemple au cas des modèles relatifs à l'énergie renouvelable. Plus concrètement, le travail consiste à coder sur Matlab les modèles à comparer et de sortir les résultats de l'analyse de sensibilité globale de chacun des modèles susmentionnés. Nous

pouvons mener plusieurs études de ce genre et mon équipe risque d'attirer les foudres provenant de tous les horizons de la communauté scientifique, mais nous ne devrions rien craindre au nom des principes de la franchise universitaire et ce risque est surtout partagé avec les journaux de parution de nos futurs articles sur ce thème.

VII.2.3. Autres sujets de recherche à réaliser dans le cadre de la préparation des mémoires de Master

i) *Veille de l'avancée de la Recherche sur l'énergie renouvelable dans le monde*

Ce travail devrait revenir au Directeur de Laboratoire, au Responsable du parcours Energétique, ou encore aux enseignants-chercheurs intervenants dans ce parcours. Cependant, vues les nombreuses charges des enseignants-chercheurs de notre laboratoire dans l'accomplissement de leurs obligations de service respectives, une autre option serait de confier cette mission à un certain nombre d'étudiants de Master.

Chaque travail entrant dans le cadre de ce type de sujet aura pour but de rapporter les études effectuées, sur un quelconque thème spécifique de l'énergie renouvelable, pour le cas d'un ou plusieurs pays à l'étranger et qui méritent d'être faites aussi pour le cas de Madagascar. Il appartient à chaque encadreur de définir le thème spécifique à traiter et les contenus de chaque travail de synthèse à faire de telle sorte que ce travail puisse être sanctionné par un diplôme de Master en Physique.

Ainsi, plusieurs sujets de recherche à court terme peuvent ressortir des résultats de ces travaux de veille de l'avancée de la Recherche sur l'énergie renouvelable dans le monde.

j) *Evaluation de potentiel énergétique de biomasse dans un certain nombre de régions de l'île*

Plus de trois-quarts de sa population étant des paysans, Madagascar est un pays à vocation agricole. La mise en œuvre d'un quelconque projet de valorisation énergétique des biomasses agricole et non-agricole au niveau d'une quelconque région de l'île est conditionnée par la connaissance a priori du fort potentiel énergétique que représentent ces biomasses. Nous pouvons limiter l'étendue géographique du travail de chaque étudiant de Master traitant ce sujet à l'une des 22 régions de Madagascar.

VII.3. Perspectives à moyen terme

Il s'agit des travaux de préparation de thèses ou encore de mémoires de Master dont les réalisations respectives ne peuvent pas se faire simultanément mais doivent se succéder l'une après l'autre.

k) *Mise au point d'un prototype de compteur électrique à faible coût*

Dans le cadre de l'électrification rurale, le coût du compteur constitue un facteur bloquant l'abonnement à l'électricité pour les villageois malgaches car ce coût initial d'abonnement (estimé actuellement à Ariary 300 000) représente l'équivalent de 60 jours de travaux aux champs (à raison de Ariary 5000/jour) pour un journalier du milieu rural. Ainsi, la réalisation d'un compteur techniquement fiable mais à coût accessible par la plupart des foyers villageois malgaches permet de contribuer à l'amélioration de l'effectif des abonnés ruraux et, par suite, à inciter les opérateurs économiques à investir davantage dans l'électrification rurale à Madagascar.

l) *Optimisation technico-économique d'une picocentrale hydroélectrique*

D'après les informations fournies par l'Agence du Développement de l'Électrification Rurale (ADER) sur son site web, les localités présentant des potentiels hydroélectriques sont nombreuses en milieux ruraux malgaches. Cette étude consiste en premier lieu à choisir un site dont les besoins en puissance électrique entre dans la gamme pouvant être répondue par une picocentrale hydroélectrique.

En effet, le service d'un bureau d'étude coûte une certaine somme, il est rare qu'un quelconque opérateur investit dans l'étude de faisabilité technico-économique de la mise en place d'une picocentrale hydroélectrique (c'est-à-dire, mise sur pied d'une infrastructure énergétique de taille très modeste) ; soit poussé par des raisons autres que technico-économique, l'opérateur ou l'ONG investit presque aveuglement sur le projet d'électrification soit l'investissement est plutôt accordé à une autre localité nécessitant la mise en place d'une microcentrale hydroélectrique.

En conséquence, les travaux de thèse ou de mémoires de Master peuvent bien répondre à ce type de besoins d'études de faisabilité technico-économique de projets d'électrification de petite envergure économique.

m) *Optimisation technico-économique d'un séchoir solaire modulaire indirect avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase*

De nombreuses études sur les systèmes de séchage solaire indirect ont été menées dans notre laboratoire [89, 90]. La plupart de ces systèmes de séchage utilisent un système d'appoint d'électrique ou une chaudière pour ajuster la température de l'air asséchant au cas où celle-ci est inférieure à la température souhaitée de consigne de l'armoire de séchage, due au caprice de l'ensoleillement. Malheureusement, ce genre de séchoir n'est généralement pas adopté en milieux ruraux des pays en développement comme Madagascar du fait, par exemple, de l'inexistence de l'électricité dans les villages ruraux et de l'inabondance progressive des combustibles à incinérer dans une chaudière destinée au chauffage d'appoint de l'air. Ainsi, il serait intéressant d'étudier un système de séchage solaire indirect n'utilisant ni système d'appoint électrique ni chaudière mais intégrant plutôt un sous système de stockage de chaleur pour palier les difficultés du chauffage de l'air asséchant dues à l'intermittence de l'ensoleillement.

Par conséquent, ce sujet de recherche comporte à la fois des études théoriques et expérimentales. La partie théorique consiste en la modélisation et simulation d'un séchoir solaire modulaire indirect lequel est composé d'un insolateur à air (type à choisir) couplé à une armoire de séchage (à choisir) et à une unité de stockage de la chaleur véhiculée par l'air chaud sortant l'insolateur. L'unité de stockage sera composée d'un réservoir (forme à choisir) dont les dimensions sont à déterminer à partir de la modélisation, de la simulation et de l'étude de faisabilité technico-économique. Afin d'atténuer l'influence de l'irrégularité, au cours de la journée, du flux solaire sur les performances de l'insolateur, il pourrait être envisagé de disposer de matériaux à changement de phase (MCPs) entre l'absorbeur et l'isolant du capteur solaire.

La partie expérimentale consiste à réaliser et à instrumenter un prototype similaire au modèle retenue lors de la modélisation. L'une des finalités de cette étude expérimentale est de valider les résultats de la modélisation et de la simulation.

n) Analyse comparative de différents modes de séchage sur la déformation et la cinétique de séchage du produit

Ce travail est essentiellement théorique et numérique. Le but est d'analyser l'influence du mode de séchage sur le coefficient de diffusion d'eau dans le produit et la cinétique de séchage. Comme mode de séchage, il serait intéressant d'envisager le séchage direct (produit exposé directement au flux solaire), le séchage indirect (produit non exposé au flux solaire) et le séchage convectif couplé à une source de micro-onde. L'écoulement d'air autour du produit se ferait soit par convection naturelle ou par convection forcée.

o) Caractérisation et optimisation de la co-digestion des substrats disponibles à Madagascar en vue de la production de biogaz à l'échelle domestique

Mon équipe de recherche a déjà mis au point, en collaboration avec l'ONG Hatch International, un digesteur amovible à usage domestique pour lequel une demande de brevet est actuellement en cours d'examen au niveau de l'Office Malgache de Propriétés Industrielles (OMAPI). Une première série de campagne de mesures expérimentales a été entamée dans le cadre de la préparation du mémoire de Rajaonahy [53] en vue de tester expérimentalement le comportement de ce digesteur pour la co-digestion d'un certain nombre de co-substrats. Ainsi, ce sujet constitue une suite de ces travaux expérimentaux.

La première partie de ce travail consiste en la caractérisation individuelle des substrats (composition, test de potentiel méthanogène ou Biochemical Methane Potential (BMP), cinétiques de dégradation) puis la mise en œuvre de réacteurs à l'échelle laboratoire pour la caractérisation et l'optimisation de la co-digestion. La seconde partie sera consacrée à l'application à l'échelle 1 à Madagascar et à la modélisation de la co-digestion. Il s'en suivra ensuite l'analyse de sensibilité paramétrique des modèles ainsi établis et enfin l'optimisation technico-économique de la co-digestion.

p) Etude théorique et mise au point d'un prototype suivie des testes expérimentaux d'un grand co-biodigesteur modulable à usage communautaire

L'avantage d'un biodigesteur amovible est de faciliter sa production à grande échelle au niveau d'un atelier artisanal maîtrisant le savoir-faire technologique à cet effet. C'est le cas du biodigesteur à usage domestique que mon équipe de recherche a utilisé récemment pour la caractérisation de la co-digestion de quelques déchets organiques à Madagascar [10]. Cependant, un certain nombre de partenaires de développement émettent le souhait que la dimension du biodigesteur convienne à l'usage communautaire plutôt que domestique individuel. De ce fait, il y a lieu de réaliser, dans un premier temps et dans le meilleur délai, les études théoriques d'un tel co-digesteur, notamment : la conception de son design, la simulation de son comportement vis-à-vis des types de co-substrats utilisés suivie de son dimensionnement et de son optimisation technico-économique. Ensuite, il importe impérativement de mettre au point un prototype et de tester expérimentalement sa performance en collaboration avec les partenaires de développement susmentionnés.

VII.4. Perspectives à long terme

VII.4.1. En génie énergétique et de l'environnement

q) *Etudes théoriques de l'efficacité énergétique des bâtiments multizones dotés des murs verts et des toits verts*

Comme extension logique des travaux antérieurement entrepris sur l'étude de la performance énergétique d'un bâtiment doté d'une toiture végétalisée [5], il serait intéressant d'étendre cette étude théorique sur le cas d'un bâtiment multizones (avec étages) dotés à la fois des murs végétalisés et du toit vert.

Entrant dans le cadre de la préparation d'une thèse, ce travail consiste à intégrer dans un code de calcul de simulation du comportement thermo-aéraulique d'un bâtiment, les codes de calcul relatifs aux modèles des murs végétalisés et des toits verts. Ensuite, à l'aide de l'outil GoSAT [2] lequel devrait être adapté pour traiter les codes de calcul programmés sur des plateformes de programmation autres que Matlab, une analyse de sensibilité globale sera effectuée afin d'identifier les paramètres les plus influents sur l'efficacité énergétique du bâtiment vert étudié. L'aspect environnemental peut également être considéré parmi les critères de performance à observer dans cette analyse. Par ailleurs, une optimisation technico-économique et une analyse de cycle de vie du bâtiment vert peuvent aussi être adjointes à cette étude.

r) *Etudes expérimentales et théoriques d'un bâtiment monozone doté d'un toit vert traitant de l'eau usée domestique*

D'une part, une des contraintes difficiles liées à la mise en œuvre de la toiture végétalisée est d'assurer l'arrosage régulier des végétations. La mise en place d'un système d'arrosage automatique du toit vert, indispensable notamment en période sèche, peut augmenter les coûts initiaux et d'entretiens du bâtiment considéré, ce qui peut décourager beaucoup de propriétaires à adopter ce type d'architecture verte.

D'autre part, nous pouvons remarquer que les cressons poussent bien dans les cressonnières alimentées par des canaux d'évacuation d'eaux usées de la capitale tananarivienne. Sachant que ce type de plante dont les valeurs des paramètres importants pour l'efficacité énergétique du toit vert [5] tels que l'indice de surface foliaire (LAI) et le taux de couverture végétale sont assez élevées, possède, comme la plupart des plantes marécageuses, un pouvoir naturel dépolluant des eaux usées.

En conséquence, similairement à l'installation du roof pond comme couverture des habitats dans les régions désertiques, il serait intéressant de mener des études théoriques et expérimentales de la performance énergétique et environnementale d'une toiture cressonnière alimentée par une partie ou la totalité de l'eau usée produite dans le bâtiment lui-même. Ainsi, à part la mesure des paramètres thermo-physiques permettant l'analyse de la performance énergétique de ce type de toit vert, l'étude expérimentale s'intéresse également à la réduction de la quantité des polluants contenus dans l'eau usée après passage dans cette cressonnière. Pour limiter la consommation d'énergie électrique liée au pompage de l'eau usée vers la toiture cressonnière, nous pourrions imaginer l'installation d'un système de pompage solaire à cet effet.

En outre, la partie théorique de cette étude peut carrément constituer un autre travail de thèse ou plusieurs travaux de préparation de mémoires de Master et consiste en la

modélisation, la simulation du comportement hydrodynamique et thermo-environnemental, l'optimisation technico-économique et l'analyse du cycle de vie d'un bâtiment doté d'une toiture cressonnière.

s) *Analyse du cycle de vie (ACV) des systèmes énergétiques au niveau d'une agglomération malgache : étude de cas de la ville d'Antananarivo*

Cette étude consiste à développer un outil permettant de mener l'ACV de l'ensemble des systèmes énergétiques dans cette ville. Sur le plan méthodologique, d'une part, une approche systémique de l'agglomération considérée sera adoptée, et d'autre part, l'utilisation des plateformes libres (open sources) telles que l'intégrateur Modelica et le langage de calcul scientifique Python, sera privilégiée autant que possible.

VII.4.2. *Dans le domaine de la planification et de la politique énergétique*

t) *Systèmes et réseaux énergétiques intelligents ou smart grids*

Dans le dessein de diminuer progressivement la part de l'énergie provenant des sources non renouvelables dans le mix énergétique d'un pays ou d'une région, il est crucial de diversifier les sources d'énergie. En effet, si chaque maison produit quotidiennement une certaine quantité d'énergie représentant, par exemple, le quart, le tiers, la moitié, l'équivalent ou plus de sa consommation électrique journalière, il n'est pas nécessaire de mettre en place des grosses installations de production d'électricité dont l'Etat aura du mal à trouver le financement.

Cependant, il ne suffit pas de maîtriser les technologies de l'énergie renouvelable liées à la production d'électricité, il importe aussi de savoir utiliser rationnellement cette énergie noble et cela commence par la limitation des pertes. L'intégration de l'énergie électrique d'origine renouvelable, autre que l'hydroélectricité, dans le système de transmission et de distribution de l'électricité n'est pas aisée dans la mesure où la production journalière (notamment celle relative au solaire et à l'éolienne) est très tributaire de la condition météorologique du lieu alors que le service d'approvisionnement d'électricité se doit de satisfaire continuellement les demandes. L'adoption des systèmes et réseaux énergétiques intelligents, plus connus sous l'appellation anglaise de « smart grid », permet grandement de faciliter cette intégration. Outre leur utilisation dans la planification énergétique des grandes agglomérations, les smart grids conviennent aussi aux petits réseaux de ravitaillement d'électricité dans les petites îles et les zones reculées.

De nombreux travaux peuvent donc découler de ce thème de smart grid et peuvent occuper toute une équipe de recherche durant plusieurs années. Cependant, pour commencer, les premiers travaux de mon équipe de recherche sur ce thème peuvent porter sur l'identification et l'inventaire des points forts et faibles de la Grande Île dans le cadre de la mise en œuvre des smart grids, c'est-à-dire, la modernisation du système d'infrastructures d'approvisionnement d'électricité allant du système central de production en passant par les réseaux de transmission et de distribution jusqu'à la commercialisation aux utilisateurs ainsi qu'aux micro-réseaux interconnectés aux systèmes de conversion d'énergie renouvelable et aux véhicules électriques. Il convient de rappeler aussi qu'avec les smart grids, les utilisateurs peuvent normalement revendre aussi l'excédent d'électricité qu'ils produisent eux-mêmes. Ensuite, une étude des scénarii et de modélisation de planification énergétique avec les

smart grids pour quelques régions du pays peut être menée. Par ailleurs, mon équipe peut également conduire une étude purement technique sur ce thème mais spécifique au cas des pays en développement comme Madagascar.

u) *Planification énergétique prévoyant la future arrivée massive des véhicules électriques au pays*

Madagascar se situe dans une zone tropicale humide. De ce fait, la majorité des malgaches ne se soucient pas trop et se passent carrément du chauffage et/ou de la climatisation des bâtiments.

Par contre, pour ce qui de l'utilisation de véhicule, de plus en plus de ménages ne peuvent plus s'en passer pour diverses raisons. Actuellement, l'entreprise Fiarafy fabriquant les voitures Karenjy ne pouvant en produire annuellement que quelques centaines, la plupart des véhicules constituant le parc automobile du pays sont donc presque tous importés. Pour le moment, les problématiques liées aux moyens de transport utilisés dans la Grande Île sont notamment d'ordre environnemental, dues notamment à la pollution occasionnée par les nombreuses voitures d'occasion âgées de plus de 10 ans, plutôt que d'ordre énergétique. Sur ce point, le secteur pétrolier étant aujourd'hui libéralisé, un des principaux moyens permettant à l'Etat de renflouer la caisse du Trésor public est le prélèvement des taxes et surtaxes sur la vente des carburants. Il est à noter que le prix du baril de pétrole brut a constamment chuté depuis juillet 2014 mais le prix à la pompe des carburants n'a pas diminué jusqu'à ce jour (Février 2016) à Madagascar.

En outre, dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique et la transition énergétique, plusieurs pays développés comme en Europe et aux Etats-Unis mettent en œuvre une politique énergétique encourageant la diffusion et commercialisation des véhicules hybrides et à batteries électriques. Ainsi, il reste aux automobilistes malgaches environ une décennie pour rouler encore avec les voitures à combustible fossile. Ensuite, ils seront obligés d'importer et utiliser les véhicules hybrides ou électriques d'occasion des pays développés car même s'il y a encore du pétrole, lorsque les constructeurs automobiles ne produiront plus de pièces détachées convenables aux véhicules actuels, les talentueux garagistes malgaches ne tiendront que quelques années pour faire des adaptations et des bricolages.

En conséquence, l'arrivée en grande quantité des véhicules électriques dans le pays est inévitable dans un peu plus d'une décennie et les problématiques énergétiques de la Grande Île seront alors pires que celles d'aujourd'hui si le pays ne s'y prépare pas dès maintenant. A cet effet, la contribution de mon équipe de recherche consiste à mener des travaux de recherche portant sur la planification énergétique appropriée à cette éventualité.

v) *Maitrise et mise au point d'outils d'aide à la décision concernant le système énergétique national*

La première action de mon équipe de recherche consisterait à se familiariser avec les outils déjà disponibles en ligne et qui peuvent être classifiés en deux catégories selon leurs objectifs :

- Outils d'optimisation lesquels sont associés à des modèles permettant d'analyser et optimiser l'évolution d'un système énergétique national sur un horizon temporel

pour minimiser le coût, tels que : MARKAL [91], OSeMOSYS [92] et 2050 Pathways [93].

- Outils de simulation lesquels sont basés sur des modèles instantanés permettant d'évaluer la configuration et le fonctionnement du système énergétique national (ou régional) sur un intervalle de temps ; une des caractéristiques clés du système énergétique national les plus couramment étudiées à cet effet étant le mix technologique pour la production d'électricité. Deux exemples de ce type d'outil sont EnergyPlan [94] et HOMER [95]. Il convient de rappeler que dans le cadre de la préparation de son mémoire de Master, Rasamimanana [51] a récemment utilisé modèle 12.1 d'EnergyPlan pour une étude planification énergétique du pays.

Il est à noter que certains outils peuvent satisfaire à la fois les deux objectifs susmentionnés. Par ailleurs, des nouvelles générations d'outils font également leur apparition, par exemple : LEAP [88] (son utilisation est déjà proposée plus haut) et le canevas de modélisation développé par Gironès et al. [96] en vue de l'aide à la décision sur les systèmes énergétiques nationaux. Ces outils ont la particularité d'être plus faciles à adapter au cas des pays où il manque des données sur le mode de consommation énergétique.

Ainsi, l'expérience acquise à l'issue des testes d'utilisation des divers outils précédemment cités permettra à mon équipe de recherche de fixer son choix d'outil d'aide à la décision dans le domaine de la politique énergétique et d'adapter, si nécessaire, l'outil ainsi choisi pour convenir au cas de Madagascar ou encore de concevoir un tout autre nouvel outil. Ce projet scientifique est classifié parmi les perspectives à long termes du fait qu'il serait possible que mon équipe de recherche aura même à développer une méthode/outil statistique de collecte de données sur le mode de consommation énergétique dans le pays.

- w) *Etude de la politique de l'éclairage publique dans les grandes agglomérations de Madagascar*
Si la société d'état JIRAMA (Jiro sy Rano Malagasy), régie par le droit commun des sociétés anonymes, le pouvait, elle se serait bien volontiers dégagée depuis longtemps du ravitaillement d'éclairage public au niveau des communes, dont la Commune Urbaine d'Antananarivo (CUA), du fait que les arriérés communaux représentent un important préjudice financier pour cette société. En effet, les produits de taxe et surtaxe sur l'électricité ne couvrent qu'une petite partie des montants des impayés des communes [97].

Depuis la chute du mur de Berlin, nombreuses sociétés d'état ont été privatisées à Madagascar sous la pression des bailleurs de fonds internationaux. Cependant, il reste encore 2 sociétés d'état dont les différents gouvernements, qui se sont succédés depuis 25 ans, ont du mal à privatiser, à savoir : la société Air Madagascar et la JIRAMA. Que les politiciens malgaches le veuillent ou non, l'effectivité de la reforme liée à l'ajustement structurel des secteurs de l'électricité et du transport aérien fera toujours partie des conditionnalités de déblocage des crédits de la part de ces bailleurs de fonds. Comme nos autorités publiques ne sont pas fatiguées de demander les aides de ces partenaires d'appuis financiers, les représentants de ceux-ci ne résignent pas de remettre sur la table de négociation les conditionnalités susmentionnées. La réforme actuelle de la société Air Madagascar tant redoutée par le syndicat de son personnel car prévoyant la suppression de plusieurs postes et l'existence de Madagasikara Airways (une nouvelle société privée de transport aérien opérant présentement sur l'espace aérien malgache), nous prouvent que les tenants du régime actuel ont enclenché la procédure de libéralisation partielle ou totale du

secteur de transport aérien malgache. Quant à la privatisation de la JIRAMA, nous pouvons nous demander si ces intempestifs et interminables délestages qui s'étendent sur plusieurs mois, voire années, ne font pas partie des manœuvres allant dans ce sens. En effet, le prix actuel de vente du kWh d'électricité appliqué par la JIRAMA n'attire pas beaucoup d'opérateurs privés à investir dans ce secteur. A la longue, ce genre de manœuvres permet de convaincre, par usure, les consommateurs à accepter l'augmentation, par un facteur de 2 ou 3, du prix du kWh. A noter que des faits similaires se sont produits dans un certain nombre de pays d'Amérique Latine et d'Afrique avant la libéralisation totale ou partielle de leur secteur d'énergie électrique. En tout cas, un développement rapide ou une bonne croissance économique du pays sans la garantie d'un bon approvisionnement en énergie électrique relève de l'utopie.

Bref, tôt ou tard, la restructuration de la JIRAMA et la privatisation totale ou partielle de ses activités sur l'électricité sont inéluctables et le rôle de l'Etat malgache sera réduit à la prise de mesures d'accompagnement de la réforme, à la mise en place des différentes réglementations et au contrôle pour, au moins, garantir la sécurité d'approvisionnement d'électricité, limiter l'émission de gaz à effet de serre occasionnée par la production et assurer un prix compétitif du kWh aux consommateurs.

De ce qui précède, s'il y a une branche d'activités de la JIRAMA qui risque vite d'être privatisée, c'est donc l'éclairage public des communes, en particulier, celui de la capitale de Madagascar. Ainsi, il importe de mener une étude pour proposer des solutions technico-économiques de cette problématique d'éclairage public. Une belle illustration de la réussite du partenariat public-privé sur ce thème est l'éclairage photovoltaïque de la route digue reliant Ampasika et Anosizato ainsi que la première partie de la route nationale N°1 reliant Ampitatafika et Fenoarivo.

Outre ce sujet sur l'éclairage public, il serait intéressant aussi donc de mener, dans un dessein d'aide à la décision, une étude consistant en l'évaluation des risques liés à la privatisation d'un certain nombre de segments du service électricité de la JIRAMA, à savoir : la production, la transmission, la distribution et la commercialisation de l'électricité.

x) *Etude comparative des projets d'électrification rurale financés par l'ADER et intégrant les technologies d'énergie renouvelable*

Sur financement du Fonds National de l'Électricité (FNE), l'Agence de Développement de l'Électrification Rurale (ADER) a pour mission de mettre en œuvre la politique du sous-secteur électricité en milieu rural à Madagascar. Ainsi, cette agence gouvernementale placée sous tutelle du ministère chargé de l'énergie a financé un certain nombre de projets d'électrification rurale depuis 2004.

Dans le but de tirer des leçons du passé sur plusieurs aspects tels que la politique énergétique, les impacts socio-économiques, la réussite et les barrières de l'intégration des technologies de l'énergie renouvelable, il serait intéressant de conduire une étude comparative des projets ainsi mis en œuvre, notamment ceux intégrant les technologies de l'énergie renouvelable.

y) *Quelques autres sous-thèmes de recherche à traiter prioritairement dans le thème de la politique énergétique*

Les approches méthodologiques à adopter restant encore à préciser, il serait souhaitable de mener des travaux de recherche portant sur les sous thèmes suivants :

- Etat des lieux de la politique énergétique adoptée à Madagascar depuis l'indépendance,
- Analyse des impacts de la politique énergétique combinée avec celle environnementale sur l'économie du pays par le biais de la modélisation,
- Analyse d'incertitude et analyse de sensibilité paramétrique des modèles utilisés dans l'étude de la politique énergétique du pays,
- Identification et priorisation selon les trois horizons temporels (court, moyen et long termes) des mesures indispensables à prendre par les décideurs politiques dans le domaine de l'énergie quelle que soit la politique énergétique appliquée par les différents régimes qui peuvent se succéder pour gouverner le pays.
- Management de la sécurité énergétique prenant en compte de la place de l'énergie verte

z) *Production d'articles de review des publications scientifiques portant sur le domaine d'activités de mon équipe de recherche*

Tout en reconnaissant le haut quotient intellectuel d'Einstein, prix Noble de la Physique en 1921, plusieurs historiens de la Science Physique s'accordent à dire que, l'examen des diverses innovations de l'époque où il a travaillé au Bureau Fédéral de la Propriété Intellectuelle à Berne en Suisse en tant qu'examineur de brevets, lui a vraisemblablement permis d'avoir des idées ou d'inspirations dans le développement de ses théories dont les échos résonnent très forts jusqu'à présent. A la rue Einsteinstrasse 2 à Berne, nous pouvons lire sur une plaque commémorative sa célèbre citation laquelle se traduit ainsi : «La source de tout progrès technique réside dans la divine curiosité et l'esprit ludique du chercheur qui cogite et expérimente, tout autant que dans l'imagination créatrice de l'inventeur.»

Bien que mon équipe de recherche n'ait pas encore publié d'article de review, nous pouvons affirmer, à la lumière de ce qui précède, que cet exercice constitue une source de bonnes idées dans la conduite de nos travaux de recherche et permet de trouver de l'inspiration par rapport à ce qui se fait et se fructifie bien ailleurs. Dorénavant, l'équipe de recherche que j'aurai l'honneur de diriger s'efforcera de produire annuellement au moins un article de review sur nos thèmes de recherche. Il est certain que plusieurs autres sujets de recherche en découleront.

VII.5. Conclusion

La liste des perspectives présentées dans le présent volet n'est pas exhaustive et est susceptible de modification selon les contextes et les besoins prévalant au niveau national et international dans le domaine de l'Energie et de l'Environnement.

Conclusion générale

Ayant soutenu ma thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle de Physique Energétique en 2004 à Antananarivo, j'ai fait 2 ans d'administration universitaire, en tant que Directeur du Partenariat et des Relations avec les Institutions à la Présidence de l'Université d'Antananarivo entre Mai 2004 et Avril 2006, avant d'embrasser définitivement la carrière d'Enseignant-Chercheur au Département de Physique de cette Université à partir du mois de Juillet 2006. Affilié à l'équipe du parcours Energétique et de l'IME, des sujets de travaux de recherche visant la préparation de 11 mémoires de DEA de Physique Energétique [22-32], d'un mémoire de Master d'Energétique [54] au Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo et de 21 mémoires de Master [33-53] de Physique du Bâtiment et de l'Environnement (PBE) à l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Sciences de l'Homme et de l'Environnement de l'Université de la Réunion ainsi que d'un mémoire de DESS d'Etude d'Impacts Environnementaux [55] de la formation co-diplômée par l'Université d'Antananarivo et l'Université de Bordeaux Montesquieu, ont été réalisés sous mon encadrement depuis 2007. A ces mémoires de DEA/Master s'ajoutent également 2 thèses dont la préparation a bénéficié de mes aides et conseils méthodologiques.

Le présent document est essentiellement basé sur un certain nombre des mémoires et thèses susmentionnés, notamment sur ceux qui ont pu être convertis en articles scientifiques publiés dans des revues et des actes de congrès à audiences internationales. Plus précisément, mon équipe de recherche a pu produire dix (10) articles de revues [2-11] et dix (10) autres communications [12-21] publiées dans des actes des congrès et conférences internationaux.

La première partie de ce document est constituée par cinq volets synthétisant les projets de recherches ayant résulté mes 20 publications [2-21]. Ainsi, le premier volet expose le développement de deux outils scientifiques dont le premier, baptisé GoSAT [2] et codé sous environnement Matlab [63], automatise l'analyse de sensibilité globale de tout modèle mathématique associé à un quelconque système physique complexe. Ce puissant outil basé sur la méthode FAST permet à son utilisateur, même si celui-ci est profane à la procédure d'analyse de sensibilité paramétrique, d'effectuer l'analyse de sensibilité globale d'un quelconque modèle. A titre d'exemple, GoSAT [2] a été utilisé avec succès pour faire l'analyse de sensibilité globale des modèles de simulation de quelques systèmes physiques complexes tels que la climatisation solaire utilisant un déshydratant liquide [6] et l'habitat doté d'un toit vert [4, 5]. Quant au second outil, il permet de simuler le fonctionnement énergétique des espaces bâtis en faisant appel aux préceptes et concepts de l'approche systémique [18].

Le deuxième volet présente nos travaux ayant lien avec l'étude de l'efficacité énergétique du bâtiment. Après un bref état des lieux de l'habitat à Madagascar, des solutions passives de conception de bâtiment adaptées aux matériaux disponibles localement et au climat des Hautes Terres de cette Grande Île ont été proposées [14], d'une part, et la bonne performance énergétique des bâtiments dotés de toits verts a été mise en exergue [3 – 5, 12, 13, 21], d'autre part.

Le troisième volet est consacré à la maîtrise de l'énergie renouvelable. Plus exactement, mon équipe de recherche a mené une étude expérimentale de la production de biogaz par co-digestion anaérobie de quelques déchets organiques en utilisant un biodigester mis au point par cette

même équipe [10] et cinq travaux théoriques portant sur la climatisation solaire [6,9], la récupération d'excès de chaleur au niveau d'un centre de cure thermale [8] et l'évaluation de potentiels de huit principaux sites de l'île en vue de la production d'électricité avec des systèmes Dish Stirling [7] ainsi que la modélisation d'un séchoir-serre solaire à moindre coût.

Le pays étant encore en phase de la transition énergétique, le quatrième volet présente une étude théorique des écoulements dans un réservoir pétrolier où le cas de Tsimiroro Madagascar a été particulièrement considéré [11].

Le cinquième volet est axé au traitement des déchets en vue de leur valorisation énergétique. Plus précisément, notre équipe de recherche a choisi les boues des stations d'épuration comme déchets et a opté pour deux filières de traitement : le séchage thermique et la méthanisation. Des travaux théoriques et expérimentaux ont conduit à cet effet et ont débouché sur 4 publications postdoctorales [16, 17, 19, 20], outre les thèses [1, 99].

Il découle de ces cinq premiers volets qu'en dépit des moyens très limités à la disposition de mon équipe, celle-ci a réussi à produire plusieurs publications internationales sans que ma personne, leader de cette équipe, ait eu à séjourner dans un laboratoire étranger. Ces résultats illustrent ma capacité à animer et diriger, de façon efficace et efficiente, une équipe de recherche dynamique. De plus, ce dynamisme nous a permis de nouer et/ou raffermir des partenariats avec un certain nombre de laboratoires des pays développés, à savoir : le laboratoire PIMENT de l'Université de La Réunion (consolidation de collaboration), le laboratoire LAMPS-GEM de l'Université de Perpignan (raffermissement de partenariat), le laboratoire LBE de Narbonne (nouveau partenariat) et le Département de Génie Civil de l'Université KU Leuven en Belgique (nouveau partenariat). Par ailleurs, certains de mes ex-encadrés ont pu également intégrer d'autres laboratoires étrangers pour la préparation de leurs thèses de doctorat tels que deux se sont réorientés en astrophysique et sont actuellement au South African Astronomical Observatory (SAAO) et à l'Université de Cape Town en Afrique du Sud tandis qu'un autre ex-encadré a séjourné au Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie (LAPLACE) de l'Université de Toulouse et a soutenu sa thèse en 2015.

En outre, plusieurs autres champs de recherches prometteurs ont été explorés dans le cadre de mes activités d'encadrement de mémoire de Troisième Cycle en DEA et en Master. Ces champs de recherche portent sur les systèmes de climatisation solaire, les interactions radiatives entre les surfaces, les serres agricoles, les picocentrales hydroélectriques, les paramètres de cinétiques de séchage, l'analyse exergétique dans les processus de conversion énergétique, l'incinération d'ordures ménagères, l'expertise Haute Qualité Environnementale, l'énergie éolienne, les éco-quartiers, les problématiques de compostage, la thermique et la physique du bâtiment, les études d'impacts environnementaux, l'Analyse de Cycle de Vie, l'analyse énergétique et exergétique d'un territoire insulaire, la planification énergétiques. Ces thématiques de recherche sont tous en lien avec les problématiques de maîtrise et gestion de l'Environnement et de l'énergie et avec le Développement Durable. Ils se situent au cœur des préoccupations exprimées aux échelles régionales et mondiales autour de ces questions au 21ème siècle.

La deuxième partie du présent document de synthèse fournit des informations complémentaires et est organisée en deux volets tels que le volet VI expose un bilan largement positif de mes travaux d'encadrement vu sous l'angle de la réussite académique et de l'insertion professionnelle de mes ex-encadrés alors que le volet VII propose des perspectives et projets de recherche. Il est précisé dans

ce dernier volet que dorénavant, les contributions de cette équipe de recherche seront axés sur deux thèmes principaux dont le premier porte encore sur le génie énergétique et de l'environnement tandis que le second constitue une réorientation progressive de ses activités à la planification et la politique énergétique.

Aussi, me reste-t-il, pour clore ces lignes, à affirmer avec une intime conviction ma volonté et détermination de réussir à animer et diriger efficacement une équipe de recherche de haut niveau, dynamique et innovante afin de contribuer davantage au développement durable de Madagascar et du monde.

Références bibliographiques

Les références ci-après sont présentées suivant leur ordre chronologique d'apparition dans le texte.

- [1] **Hery Tiana Rakotondramiarana**, "Etude théorique du séchage thermique et de la digestion anaérobie des boues des stations d'épuration - Mise au point des dispositifs pilotes de laboratoires pour la caractérisation expérimentale liée au séchage et à la méthanisation des boues". Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle en Physique, Université d'Antananarivo, 2004.

Articles de revues à audience internationale

- [2] **Hery Tiana Rakotondramiarana** and Ando Ludovic Andriamamonjy, «Matlab automation algorithm for performing global sensitivity analysis of complex system models with a derived FAST method», *Journal of Computations & Modelling*, vol.3, no.3, 2013, pp. 17-56.
- [3] Dominique MORAU, **RAKOTONDRAMIIARANA Hery Tiana** and ANDRIAMAMONJY Ando Ludovic, "Simple Model for the Theoretical Survey of the Green Roof Thermal Behavior", *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*, vol. 1, no. 2, 2012, pp. 92-102.
- [4] MORAU Dominique, **RAKOTONDRAMIIARANA Hery Tiana**, RANAIVOARISOA Tojo Fanomezana, ANDRIAMAMONJY Ando Ludovic, "Thermal Behavior of Green Roof in Reunion Island: Contribution towards a Net Zero Building", *Energy Procedia*, vol. 57, 2014, pp. 1908– 1921.
- [5] **Rakotondramiarana, H.T.**; Ranaivoarisoa, T.F.; Morau, D., "Dynamic Simulation of the Green Roofs Impact on Building Energy Performance, Case Study of Antananarivo, Madagascar", *Buildings*, vol. 5, no.2, 2015, pp. 497-520.
- [6] **Hery Tiana Rakotondramiarana**, Sambatra Hagatiana Andrianomena, Ando Ludovic Andriamamonjy and Minoson Sendrahasina Rakotomalala, « Modeling and Global Sensitivity Analysis of a Solar Powered Air Cooling System Using Liquid Desiccant», *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*, vol. 2, no. 4, 2013, pp. 327-339.
- [7] Jean Philippe Praene, Mamy Harimisa Radanielina and **Hery Tiana Rakotondramiarana**, "Dish Stirling system potential assessment for eight main sites in Madagascar", *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 13, no. 1, 2016, pp. 119 – 141.
- [8] **Hery Tiana Rakotondramiarana**, Mamy Harimisa Radanielina and Andriamaholisoa Yvan Ramananjatovo, "Techno-Economic Investigation of a Thermal Cure Center Excess Heat Recovery System for Producing Hot Water for a Hotel in Antsirabe Madagascar", *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*, vol. 4, no. 1, 2015, pp. 10-20.
- [9] Jean Philippe Praene, Olivier Marc, Habiba Ennamiri, **Hery Tiana Rakotondramiarana**, "Sensitivity Analysis to Optimize a Solar Absorption Cooling System", *Energy Procedia*, vol.57, 2014, pp. 2636–2645.
- [10] Michard R. Rajaonahy, **Hery Tiana Rakotondramiarana**, Lova Landry Rakotoarisoa, Michaël Niandrisoa Ranarivelo, "Experimental Investigation of Anaerobic Co-Digestion of some Organic Wastes in Madagascar", *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, vol. 3, no. 1, 2016, pp. 3676 – 3682.
- [11] Malik El'Houyouun Ahamadi, **Hery Tiana Rakotondramiarana**, Rakotonindrainy, "Modeling and Simulation of Compressible Three-Phase Flows in an Oil Reservoir: Case Study of Tsimiroro Madagascar", *American Journal of Fluid Dynamics*, vol. 4, no. 4, 2014, pp. 181-193.

Publications à des congrès internationaux à comité de lecture avec diffusion des actes

- [12] Andriamamonjy A.L., **Rakotondramiarana H.T.**, Rajaonahy M.R., Rafieferantsoa M.H., Morau D., «Proposition d'un modèle simple pour l'étude théorique du comportement thermique d'un couvert végétal», Actes du 1^{er} Congrès International Plasma-Energie (CIPE) du 16 au 20 Juillet 2012. Antananarivo - Madagascar.
- [13] Michard Rockson Rajaonahy, Dominique Morau, Mamy Harimisa Radanielina, **Hery Tiana Rakotondramiarana**, « Modélisation et analyse de sensibilité globale d'un toit vert en zone tropicale humide », Actes du 2^{ème} Congrès International Plasma-Energie (CIPE) du 15 au 19 Décembre 2014. Antananarivo – Madagascar.
- [14] Razanamanampisoa H, Randriamanantany Z.H., **Rakotondramiarana H.T.**, Garde F., Boyer H., "Simulation of a typical house in the region of Antananarivo, Madagascar - determination of passive solutions using local materials", Proceedings of the Third High-Energy Physics International Conference, HEP-MAD 07, Antananarivo, Madagascar, September 10-15, 2007.
- [15] **Rakotondramiarana H.T.**, Rakotoarisoa L.L., Ahamadi M. El'H., Andriamamonjy A.L., Rajaonahy M.R., «Etude théorique d'un séchoir-serre à moindre coût pour les produits agricoles », Actes du 1er Congrès International Plasma-Energie (CIPE) du 16 au 20 Juillet 2012. Antananarivo - Madagascar.
- [16] **Rakotondramiarana H.T.**, Morau D., Adelard L., Gatina J.C., « Modélisation du séchoir solaire : application au séchage en couche mince des boues solides des stations d'épuration ». Proceedings des 12èmes Journées Internationales de Thermique, du 15 au 17 novembre 2005 à Tanger – Maroc.
- [17] **Rakotondramiarana H.**, Morau D., Adelard L., Mara T., Gatina J.C., « Theoretical and Experimental study of activated sludge drying of wastewater ». Proceedings of the 1st International Conference on Engineering for Waste Treatment (WasteEng2005), du 17 au 19 Mai 2005, Albi, France, pp.1-8.
- [18] Gatina J.C., Rakotonarivo N.I., Rakoto Joseph O., Andrianandraina, **Rakotondramiarana H.T.**, "Description and systemic modelling of energy working built spaces". Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings – IAQVEC. August 15-18, 2010, Syracuse, New York, USA.

Communication orale dans un colloque international

- [19] Rakotondramiarana H.T., and Morau D., «Analyse de sensibilité paramétrique d'un modèle dynamique permettant le contrôle et suivi de la stabilité du procédé de digestion anaérobie des divers déchets liquides fermentescibles ». Actes du Colloque «Journées thématiques Biomasses et Bioénergies» du 29 Mai au 1er Juin 2012, IUT de Saint Pierre, Université de La Réunion.

Communications affichées sous forme de posters dans une conférence internationale

- [20] Morau D., Adelard L., **Rakotondramiarana H.**, Mara T., Gatina J.C., « Theoretical and Experimental study of anaerobic fermentation process in mesophil wastewater treatment ». Proceedings of the International Solid Waste Association (ISWA 2004), October, 2004, Rome, Italy, pp.1-11.
- [21] Dominique Morau, Mamy Harimisa Radanielina, Minoson Sendrahasina Rakotomalala, **Hery Tiana Rakotondramiarana**. "Numerical investigation of green roof energy performance".

Proceedings of the 7th High-Energy Physics International Conference, HEPMAD 15, Antananarivo, Madagascar, September 17-22, 2015.

Mémoires de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) réalisés sous mon encadrement

- [22] Sambatra Hagatiana ANDRIANOMENA, « Mise au point d'un code de calcul d'étude du comportement d'un système de climatisation solaire utilisant une solution de chlorure de lithium comme liquide déshydratant », Mémoire de DEA en Physique Energétique, 2008.
- [23] Lalaharivonjy Pascal RATOVOSON, « Mise au point d'un code de calcul numérique de facteur de forme géométrique entre deux surfaces finies en regard », Mémoire de DEA en Physique Energétique, 2009.
- [24] Malik El'Houyoune AHAMADI, « Etude théorique d'une serre à section droite triangulaire isocèle de faible cout pour le séchage des produits agricoles », Mémoire de DEA en Physique Energétique, 2010.
- [25] Jacky RAZAFINDRAKOTO, « Analyse de sensibilité paramétrique d'un modèle simulant un système de climatisation solaire utilisant une solution de chlorure de lithium comme liquide déshydratant », Mémoire de DEA en Physique Energétique, 2010.
- [26] Mika Haristry RAFIEFERANTSOA, « Mise au point d'un code de calcul pour l'étude du comportement thermique des différentes composantes d'une toiture végétalisée », Mémoire de DEA en Physique Energétique, 2011.
- [27] Ando Ludovic ANDRIAMAMONJY, « Algorithme d'automatisation de la méthode d'analyse de sensibilité globale des modèles des systèmes complexes – application sur un modèle simulant une toiture végétalisée », Mémoire de DEA en Physique Energétique, 2012.
- [28] Michard Rockson RAJAONAHY, « Modélisation et analyse de sensibilité globale d'un toit vert », Mémoire de DEA en Physique Energétique, 2014.
- [29] Lova Landry RAKOTOARISOA, « Analyse de sensibilité globale et optimisation d'un séchoir serre de section droite triangulaire isocèle », Mémoire de DEA en Physique Energétique, 2014.
- [30] Noromahefa RANDRIAMBAHOAKA, « Analyse exergétique d'un système de conversion d'énergie renouvelable : cas de la picocentrale hydroélectrique d'Andriantsemboka Analamanga Madagascar », Mémoire de DEA en Physique Energétique, 2014.
- [31] Heritina Larissa RAZAFIMANDIMBY, « Détermination expérimentale des paramètres de cinétique de séchage des feuilles de manioc pilées et du paddy dans un séchoir serre à faible cout », Mémoire de DEA en Physique Energétique, 2014.
- [32] Nasandratra Jean Jaurès RATSIMBAZAFIHARIVOLA, « Investigation théorique d'un toit vert a l'aide de la méthode des volumes finis combinée avec celle des différences finies », Mémoire de DEA en Physique Energétique, 2015.

Mémoires de Master réalisés sous mon encadrement (Master délocalisé à l'IST Antananarivo)

- [33] Roger RANDRIAMIARISOA, « L'usine d'incinération d'ordures ménagères », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2008.
- [34] Haro Andriantseheno RAZAFIMIANDRARIVO, « Expertise HQE et structurelle d'un bâtiment à usage scolaire », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2009.

- [35] Mbolanirina Tanteliniaina RAMANANDRAIBE, « Dimensionnement d'un système éolien pour le bâtiment C de l'Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2009.
- [36] Irina NAMBININANDRO, « Etude d'un lotissement à basse consommation d'énergie », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2010.
- [37] Alexandra RANAIVOSON, « Perspective et outils d'analyse de l'écoferme Vincenzo », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2010.
- [38] Sylvain Albert LEZO, « Contribution à l'étude de faisabilité d'un projet de compostage des boues d'épurations des trafics nautiques dans le port de Toamasina : application d'un modèle mathématique de prédiction », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2010.
- [39] Tahina Olivier ANDRIANIAINA, « Flux énergie de l'écoferme Vincenzo par l'approche systémique et dimensionnement des systèmes énergétiques renouvelables », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2010.
- [40] Tojo Fanomezana RANAIVOARISOA, « Modélisation dynamique monodimensionnelle des transferts hygrothermiques dans les toitures végétalisées », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2012.
- [41] Jean Elysée RAKOTONIMANANA, « Démarche HQE sur la conception et construction d'une villa sise à Toamasina », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2012.
- [42] Judicaël RAKOTOBÉ, « Etude du confort thermique pour le projet Trano Mora à Madagascar », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2013.
- [43] Willy RAZAKA, « Auto-électrification et étude du confort thermique d'un bâtiment à usage commercial sis à Anosy », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2013.
- [44] Andriamaholisoa Yvan RAMANANJATOVO, « Etude du potentiel énergétique du centre thermal d'Antsirabe », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2013.
- [45] Ony RAMAHERISON, « Etude d'un bâtiment R+2 avec chauffe eau solaire et étude du confort thermique », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2013.
- [46] Ida Vololonjanahary RAZANAKOTO, « Etude d'impact environnemental de la ferme avicole d'Avitech et étude théorique de la méthanisation des fientes », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2014.
- [47] Ravakiniaina Thierry NAMBININTSOA, « Modélisation d'un système de production d'énergies à partir des résidus de bois en vue de les valoriser en une source d'énergies : cas de la société Tropical Wood », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2014.
- [48] Ismael Mohamed HASSANI, « Analyse de cycle de vie du mix électrique des Comores », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2015.

- [49] Michaël Niandrisoa RANARIVELO, « Analyse exergetique de l'île de La Réunion », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2015.
- [50] Levith Manankasina ANDRIAMALITIARAY, « Analyse exergetique d'un séchoir serre pour paddy », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2015.
- [51] Enintsoa RASAMIMANANA, « Planification énergétique de Madagascar par restructuration du système énergétique en place à partir du modèle 12.1 d'Energyplan », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2015.
- [52] Antsa Fahazavana RANDRIANTSOANIAINA, « Modélisation de la gazéification en lit fluidisé circulant de la biomasse », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2015.
- [53] Michard Rockson RAJAONAHY, « Etude expérimentale de la production de biogaz en combinant quelques déchets organiques », Mémoire de Master en Génie Civil, Génie Energétique et Génie de l'Environnement, Université de la Réunion, 2015.

Mémoire de Master du parcours Energétique réalisé sous mon encadrement (depuis 2015)

- [54] Tahiry Landry RAZANAJATOVO, « Modélisation et analyse exergetique d'un système de gazéification des résidus de bois en vue de la production d'électricité », Mémoire de Master en Physique Energétique, 2016.

Mémoire de Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées (DESS) réalisé sous mon encadrement

- [55] Lauréat Garcin RAZAFIMANANTSOA, « Analyse de cycle de vie et études d'impacts environnementaux du cuiseur solaire parabolique dans la région du sud-ouest de Madagascar », Mémoire de DESS en Etudes d'Impacts Environnementaux, co-diplômé par l'Université d'Antananarivo et l'Université Montesquieu Bordeaux IV, 2008.

Thèses soutenues dont les préparations ont bénéficié de mes aides et conseils méthodologiques

- [56] Vonifanjaniaina ANDRIANANTOANDRO, « Modélisation de l'interaction d'un plasma d'arc avec un matériau », Thèse de Doctorat en Physique, Université d'Antananarivo, 2011.
- [57] Malik El'Houyoune AHAMADI, « Modélisation et mise au point d'un code multiphasique pour les écoulements multiphasiques en milieux poreux : application au gisement pétrolier de Tsimiroro », Thèse de Doctorat en Physique, Université d'Antananarivo, 2014.

Thèse soutenue avec ma participation parmi les membres du Jury

- [58] Christelle Hatik, « Proposition de scénarios de gestion raisonnée des déchets en vue de leur valorisation énergétique en milieu insulaire », Thèse de Doctorat en Environnement et Génie Urbain, Université de La Réunion, 2015.

Autres références

- [59] T. A. Mara, « Contribution à la validation d'un logiciel de simulation du comportement thermo-aéraulique du bâtiment : Proposition de nouveaux outils d'aide à la validation », Thèse de Doctorat, Université de La Réunion, 2000.

- [60] H. Boyer, « Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles », Thèse de Doctorat, Université de La Réunion, 1993.
- [61] Jeannot Arsène RAJAONARIVELO, « Réalisation d'un code de calcul de simulation thermique, aéraulique et hydrique de l'habitat à Madagascar », Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle en Physique, Université d'Antananarivo, 2002.
- [62] Onimihamina RAKOTO JOSEPH, « Contribution, validation et application du code de calcul de simulation thermique de l'habitat. Proposition de recommandations dans la construction à Madagascar ». Thèse de Doctorat en Physique, Université d'Antananarivo, 2004.
- [63] Matlab. High-performance Numerical Computation and Visualization Software; The Mathworks, Inc.: Natick, MA, USA, 2010.
- [64] R.I. Cukier, C.M. Fortuin, K.E. Shuler, A.G. Petschek, and J.H. Schaibly, "Study of the Sensitivity of Coupled Reaction Systems to Uncertainties in Rate Coefficients. I. Theory", *The Journal of Chemical Physics*, vol. 59, no. 8, 1973, pp. 3873-3878.
- [65] J.W. Cooley & J.W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series". *Math. Computat*, vol.19, 1965, pp. 297-301.
- [66] D. Marquardt, "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters", *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 11, no. 2, 1963, pp. 431-441.
- [67] I.M. Sobol', "Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models", *Matematicheskoe Modelirovanie*, vol. 2, 1990, pp. 112-118 (in Russian), translated in English in Sobol' [68].
- [68] I.M. Sobol', "Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models", *Mathematical Modeling & Computational Experiment (English translation of Russian original paper [67])*, vol. 1, no. 4, 1993, pp. 407-414.
- [69] Harimalala RAZANAMANAMPISOA, « Modélisation de l'habitat type Tsipoy du Trano Gasy Vaovao dans la région d'Antananarivo - Recherche de solutions passives », Thèse de Doctorat en Physique, Université d'Antananarivo, 2007.
- [70] E.P. Del Barrio, "Analysis of the green roofs cooling potential in buildings", *Energy Build.*, vol. 27, 1998, pp. 179-193.
- [71] E.P. Del Barrio, "Roof components models simplification via statistical linearization and model reduction techniques", *Energy Build.*, vol. 29, 1999, pp. 259-281.
- [72] E. Alexandri, and P. Jones, "Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roof on the built environment: Comparison with experimental results", *Build. Environ.*, vol. 42, 2007, pp. 2835-2849.
- [73] R. Djedjig, S. Ouldboukhitine, R. Bélarbi, and E. Bozonnet, "Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs". *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 39, 2012, pp. 752-761.
- [74] I. Jaffal, S. Ouldboukhitine, and R. Belarbi, "A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance", *Renew. Energy*, vol. 43, 2012, pp. 157-164.
- [75] G. Kotsiris, A. Androutsopoulos, E. Polychroni, and P.A. Nektarios, "Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs", *Energy Build.*, vol. 45, 2012, pp. 240-249.
- [76] T.R. Mancini, "Solar-electric Dish Stirling System Development", Technical Report for Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185 USA, 1997. URL : <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/622476> (visité le 8 décembre 2015)
- [77] P.R. Fraser, "Stirling Dish System Performance Prediction Model", Master's Thesis, University of Wisconsin - Madison, 2008.

- [78] M. Abbas, N. Said, and B. Boumeddane, "Thermal analysis of Stirling engine solar driven", *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 11, no. 4, 2008, pp. 503-514.
- [79] S.Y. Wu, L. Xiao, Y. Cao, and Y.R. Li, "A parabolic dish/AMTEC solar thermal power system and its performance evaluation", *Energy*, vol. 87, 2010, pp. 452-462.
- [80] O. Marc, J.-P. Praene, A. Bastide, and F. Lucas, "Modeling and experimental validation of the solar loop for absorption solar cooling system using double-glazed collectors", *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, 2011, pp. 268-277.
- [81] J.P. Praene, O. Marc, F. Lucas, and F. Miranville, "Simulation and experimental investigation of solar absorption cooling system in Reunion Island", *Applied Energy*, vol. 88, 2011, pp. 831-839.
- [82] T.A. Mara, H. Boyer, F. Garde, "Parametric sensitivity analysis of a test cell thermal model using spectral analysis", *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 124, no. 3, 2002, pp. 237-242.
- [83] A. Saltelli, and R. Bolado, "An alternative way to compute Fourier amplitude sensitivity test (FAST) ", *Computational Statistics & Data Analysis*, vol. 26, 1998, pp. 445-460.
- [84] S. Krogstad, K.A. Lie, H.M. Nilsen, J.R. Natvig, B. Skaflestad, and J.E. Aarnes, "A Multiscale Mixed Finite-Element Solver for Three-Phase Black-Oil Flow", *Proceedings of the Society of Petroleum Engineers (SPE) Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, Texas, USA, 2009*, pp. 1-14.
- [85] S. Geiger, S. Matthäl, J. Niessner, and R. Helmig, "Black-Oil Simulations for Three-Component, Three-Phase Flow in Fractured Porous Media", *SPE journal*, vol. 14, no. 2, 2009, pp. 338-354.
- [86] E. Abreu, "Numerical modeling of three phase im-miscible flow in heterogeneous porous media with gravitational effects", *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 97, 2014, pp. 234-259.
- [87] S.H. Lee, C. Wolfsteiner, and H.A. Tchelepi, "Multiscale finite-volume formulation for multiphase flow in porous media: black oil formulation of compressible, three-phase flow with gravity", *Computational Geosciences*, vol. 12, no. 3, 2008, pp. 351-366.
- [88] COMMEND, « LEAP : the Long range Energy Alternatives Planning System », Stockholm Environment Institute - US Center, MA 02144, USA. URL : <http://www.energycommunity.org/default.asp?action=47> (visité le 8 décembre 2015)
- [89] Hery Tiana RAKOTONDAMIARANA, « Evaluation des systèmes énergétiques de séchage solaire réalisés à l'Institut pour la Maîtrise de l'Energie de 1982 à 1997 », Mémoire de DEA, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, 1997.
- [90] H.T. RAKOTONDAMIARANA, B.J. ANDRIANANTENAINA, M.S. RAKOTOMALALA, «Le séchage solaire à Madagascar». Actes du Colloque « Semaine de l'Institut pour la Maîtrise de l'Energie », du 8 au 13 décembre 1997, Antananarivo, Madagascar.
- [91] G.C. Tosato, "Introduction to ETSAP and the MARKAL-TIMES models generators". In: International Energy Agency: NEET Workshop; 2007. URL, http://www.ieaetsap.org/web/Workshop/Brazil_11_2007/ETSAP-institutional-for-NEET.pdf (visité le 26 novembre 2015).
- [92] M. Howells, H. Rogner, N. Strachan, C. Heaps, H. Huntington, S. Kypreos, et al., "OSeMOSYS: the open source energy modeling system: an introduction to its ethos, structure and development", *Energy Policy*, vol. 39, no. 10, 2011, pp. 5850 – 5870.
- [93] 2050 calculator spreadsheet: "How to" guide. UK Department of Energy and Climate Change; 2012. URL, https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/65606/6966-2050-calculator-spreadsheet-how-to-guide.pdf (visité le 10 décembre 2014).

- [94] H. Lund, and E. Münster, "Modelling of energy systems with a high percentage of CHP and wind power", *Renew Energy* 2003, vol. 28, no. 14, 2003, pp. 2179-2193.
- [95] HOMER - "hybrid renewable and distributed generation system design software". URL <http://homerenergy.com/> (visité le 21 décembre 2014).
- [96] V.C. Gironès, S. Moret, F. Maréchal, and D. Favrat, « Strategic energy planning for large-scale energy systems: A modelling framework to aid decision-making », *Energy*, in Press 2015. Doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.008>
- [97] F. RAMINOMALALA, « Contribution à l'amélioration de la gestion de recouvrement de créance : cas de la société Jiro sy Rano Malagasy », Mémoire de maîtrise ès-Sciences en Gestion, Faculté DEGS, Université d'Antananarivo, 2004.
- [98] E.A. Nidhoimi, J-C. Gatina, J-Ph. Praene, and A.H. Fakra. « Approche dynamique du fonctionnement énergétique d'un espace bâti et bilan carbone associé : Application sur un gîte rural situé à Mayotte ». Actes du 2ème Congrès International Plasma-Energie (CIPE) du 15 au 19 Décembre 2014. Antananarivo – Madagascar.
- [99] D. Morau, « Modélisation des dispositifs de revalorisation énergétique des déchets solides et liquides - Mise en œuvre d'un outil d'aide à la conception multi – systèmes et multi – modèles », Thèse de Doctorat, Université de La Réunion, 2006.
- [100] O. Bernard, Z. Hadj-Sadok, D. Dochain, A. Genovesi, and J-Ph. Steyer: "Dynamical model development and parameter identification for anaerobic wastewater treatment process", *Biotechnology & Bioengineering*, vol. 75, no. 4, 2001, pp. 424-439.

RESUME

Les travaux de l'équipe de recherche encadrée par l'auteur ont pour objet de contribuer à la maîtrise de l'énergie renouvelable pour relever les défis de la transition énergétique mondiale et du développement durable de Madagascar. Plus précisément, les travaux de cette équipe ont porté sur cinq sous-thématiques, à savoir : 1°) le développement de deux outils scientifiques dont l'un automatise l'analyse de sensibilité globale de tout modèle mathématique associé à un quelconque système physique complexe et l'autre permet de simuler le fonctionnement énergétique des espaces bâtis en faisant appel aux préceptes et concepts de l'approche systémique ; 2°) l'efficacité énergétique des bâtiments où, après un bref état des lieux de l'habitat à Madagascar, des solutions passives de conception de bâtiment adaptées aux matériaux disponibles localement et au climat des Hautes Terres de cette Grande Île ont été proposées, d'une part, et la bonne performance énergétique des bâtiments dotés de toits verts a été mise en exergue, d'autre part; 3°) la maîtrise de l'énergie renouvelable où cette équipe a mené une étude expérimentale de la production de biogaz par co-digestion anaérobie de quelques déchets organiques et quatre travaux théoriques portant sur la climatisation solaire, la récupération d'excès de chaleur au niveau d'un centre de cure thermique et l'évaluation de potentiels de huit principaux sites de l'île en vue de la production d'électricité avec des systèmes Dish Stirling ainsi que la modélisation d'un séchoir-serre solaire à moindre coût; 4°) l'étude théorique des écoulements dans un réservoir pétrolier où le cas de Tsimiroro Madagascar a été particulièrement considéré du fait que le pays est encore en phase de la transition énergétique ; 5°) Etudes théorique et expérimentale du traitement des boues des stations d'épuration par le séchage thermique et la méthanisation. En dépit des moyens très limités à la disposition de cette équipe, celle-ci a produit plusieurs publications internationales sans que l'auteur, leader de cette équipe, ait eu à séjourner dans un laboratoire étranger. Par ailleurs, le bilan des travaux d'encadrement effectués par l'auteur a été dressé en termes de réussite académique et de l'insertion professionnelle de ses ex-encadrés et s'avère largement positif. Ces résultats mettant en évidence la capacité et le dynamisme de cette équipe, ont permis à celle-ci de nouer et/ou raffermir des partenariats avec un certain nombre de laboratoires des pays développés. Dans les perspectives, il a été précisé que dorénavant, les contributions de cette équipe de recherche seront axées sur deux thèmes principaux dont le premier porte encore sur le génie énergétique et de l'environnement tandis que le second constitue une réorientation progressive de ses activités à la planification et la politique énergétique.

Mots clés : Energie renouvelable, Analyse de sensibilité globale, Efficacité énergétique des bâtiments, Toit vert, Climatisation solaire, Centrales de Dish Stirling, Co-digestion anaérobie, Récupération de chaleur géothermale, Planification énergétique.

ABSTRACT

The works of the author's research team aim to contribute to the development of renewable energy in order to meet the challenges of global energy transition and sustainable development of Madagascar. Specifically, these works focused on five sub-themes, namely: 1°) Developing of two scientific tools, the first automates the global sensitivity analysis of any mathematical model associated with any complex physical system and the second enables to do description and systemic modeling of energy working built spaces by means of precepts and concepts of the systemic approach; 2°) After a brief review of the habitat in Madagascar, passive solutions in building design to improve the energy efficiency of buildings were proposed; those solutions are perfectly adequate to the climate of the highlands of the Big Island and require materials which are locally available; in addition, the good energy performance of buildings with green roofs was also highlighted; 3) As contribution to developing renewable energy, this team conducted an experimental study of biogas production by anaerobic co-digestion of some organic wastes and four theoretical works on solar cooling, recovering excess heat at a thermal cure center, assessing potentials of eight main areas with Dish Stirling systems, and modeling a low cost solar greenhouse dryer; 4°) Theoretical investigation of flows in an oil reservoir in which a case of Tsimiroro Madagascar was especially considered as the country is still in the process of energy transition; 5°) Theoretical and experimental studies of thermal drying and methanation of sludge from wastewater treatment plants. Despite very limited resources available to this team, it successfully produced several international publications without the author, leader of the team, had to stay in any foreign laboratory. Furthermore, the author's works in terms of supervision which were assessed based on both academic achievement and employability of his former students were deemed very successful. While showing the ability and dynamism of this team, these results enabled it to establish and / or reinvigorate international collaborations with a number of laboratories in developed countries. In the perspectives, it was clarified that henceforth the contributions of this research team will focus on two main themes: the first is still on energy and environmental engineering while the second is a progressive reorientation of its activities in energy planning and policy.

Keywords: Renewable energy, Global sensitivity analysis, Energy efficiency of buildings, Green roof, Solar cooling, Dish Stirling systems, Anaerobic co-digestion, Geothermal heat recovery, Energy planning.

Directeur de HDR

RAKOTOMALALA Minoson Sendrahasina
Professeur Titulaire
Mention Physique et Applications
Domaine Sciences et Technologies
Université d'Antananarivo

Impétrant

RAKOTONDRIAMARANA Hery Tiana
Mobile : 033 02 987 12
E-mail : herytiana.rakotondriamarana@univ-
antananarivo.mg
Logt 606 Bis Cité des 67 Ha – Antananarivo