



HAL
open science

Énergie et territoires : Une approche multi-scalaire de la transition écologique

Jean-Philippe Praene

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Praene. Énergie et territoires : Une approche multi-scalaire de la transition écologique. Génie des procédés. Université de La Réunion, 2020. tel-03106547

HAL Id: tel-03106547

<https://hal.univ-reunion.fr/tel-03106547>

Submitted on 11 Jan 2021

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

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

UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION
FACULTÉ SCIENCES DE L'HOMME ET DE L'ENVIRONNEMENT

ÉCOLE DOCTORALE 542
SCIENCES TECHNOLOGIES ET SANTÉ

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Présentée et soutenue par
Jean Philippe PRAENE

Énergie et territoires : Une approche multi-scalaire de la transition écologique.

Laboratoire **PIMENT** – EA 4518

04 Décembre 2020

Jury :

Rapporteurs : Belkacem ZEGHMATI - Professeur , Université de Perpignan
Alexandra SCHAFFAR - Professeur, Université de Toulon
Monica SIROUX - Professeur, INSA de Strasbourg

Examineurs : Harry BOYER - Professeur, Université de la Réunion
Jean Claude GATINA - Professeur, Université de la Réunion
İlan KELMAN - Professeur, University College of London
Bastian SCHRÖTER - Professeur, HFT Stuttgart

à Johane
Maxime & Sarah
à mes Parents.

Remerciements

L'exercice de synthèse auquel invite le temps d'une HDR est aussi un moment privilégié où je peux posément prendre le temps de remercier celles et ceux qui m'ont accompagné sur ce chemin de la Recherche depuis plusieurs années.

En tout premier lieu, je voudrais adresser mes profonds remerciements au Pr Jean Claude GATINA. Plus qu'un simple directeur d' HDR tu es et resteras un véritable mentor qui m'inspire tout au long de mon parcours. Je te dois beaucoup, d'avoir poursuivi ma thèse, de mettre lancé dans cette introspection qu'a été ce manuscrit. Merci de la confiance et de la bienveillance que tu m'as accordées très tôt dans mon parcours de jeune chercheur. Malgré nos divergences, nous avons su cultiver cette amitié solide qui nous a permis de toujours nous retrouver sur la route un peu plus loin et nouveau avancer ensemble.

J'exprime toute ma reconnaissance aux Professeurs Monica Siroux, Alexandra Schaffar et Belkacem Zeghmati pour avoir accepté d'être les rapporteurs de mon mémoire d'HDR, et de m'avoir fait l'honneur d'évaluer mon travail. Je les remercie grandement malgré les circonstances actuelles de la COVID-19 de m'avoir accordé de leur temps et de s'être rendu à la Réunion pour ma soutenance.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude au Professeur Harry Boyer pour son soutien et ses conseils avisés sur la vie du chercheur. Sa simplicité et sa bienveillance n'ont d'égale que sa bonne humeur et sa curiosité scientifique permanentes qui demeurent un modèle pour moi.

J'aimerai chaleureusement remercier les Professeurs Bastian Schröter et Ilan Kelman, d'avoir pris le temps d'examiner mon travail. Merci pour ces nouvelles perspectives de coopération qui s'annoncent d'ores et déjà très stimulantes.

Je ne peux faire le bilan de ces dix ans de carrière sans me remémorer le souvenir de tous ces collègues qui ont fait partie de mon cheminement. En premier lieu, je repense à mes camarades de thèse Vincent, Dominique, Mathieu avec qui j'ai commencé mon parcours de jeune chercheur, merci pour votre amitié et nos collaborations au fil de ces années. Un grand merci à tous mes collègues du laboratoire PIMENT, qui ont pu à un moment ou à un autre m'aider dans mes travaux.

Depuis mon recrutement au sein du département SBE, j'ai côtoyé un grand nombre de collègues avec la particularité d'avoir été témoin plusieurs arrivées et départs. Je souhaite aujourd'hui remercier toutes ces personnes avec qui nous avons écrit une partie de l'histoire de notre département. J'aimerai en particulier saluer les derniers arrivés Harimisa, Bruno, Garry, Fabienne dans la "*SBE Family*". Bien plus que des collègues, ce sont aujourd'hui de véritables amis sur qui je peux m'appuyer sans craindre.

Je voudrai saluer ici Fakra qui a été un frère d'armes ces derniers mois, embarqué dans la même aventure que moi. Merci pour ton intégrité, pour nos longues discussions autour de l'HDR, de notre vision de la recherche, de comment nous avons évolué en dix ans.

Un grand remerciement à tous mes collègues au-delà des mers, je pense en particulier à Hery, Luc, Vero, Jean et Bienvenue de Madagascar, mais également Pratima et Rajesh de Maurice. Je voudrai remercier chaleureusement Dinesh Surroop, dont la rencontre a noué une amitié très forte entre nos départements, et m'a fait grandir rapidement dans la recherche. Merci de ta gentillesse, mais surtout de ta simplicité exemplaire qui est la marque d'un talent immense et d'une grande qualité humaine.

Mes remerciements les plus vifs vont à Fiona, qui depuis 5 ans est ma collaboratrice principale et une amie sur qui j'ai pu compter. Merci d'avoir accepté cet effort intellectuel de la transdisciplinarité tant parlé et si peu approprié. Notre rencontre scientifique a été l'objet pour moi d'un véritable virage scientifique, grâce à toi j'ai pu m'ouvrir à une vision plus large de nos enjeux sociétaux. Merci, de la patience qui a été la tienne pour m'initier à la thématique de l'urbanisme. J'apprécie la scientifique exigeante que tu es et l'amie fidèle sur qui je peux compter, mille fois merci pour ce que nous avons encore à accomplir.

Je ne peux oublier les nombreux étudiants que j'ai pu suivre tout au long de ces dix ans. Je voudrai remercier mes doctorants que j'ai pu encadrer, je pense, à Eve, Kelvin, Ludovic qui m'ont permis d'avancer dans les nouveaux axes de recherche que je portent. Mais également remercier celles et ceux que je dirige qui sont outre-mer Nausheen, Nabilah (Maurice), Lanto (Madagascar) ou à la Réunion, Miangaly, Valentin.

Je voudrais adresser deux remerciements particuliers à deux d'entre eux. Tout d'abord des remerciements sincères à Vanessa Rakotoson qui a été la première thèse que j'ai eu le privilège d'encadrer. Merci Vanessa pour ta gentillesse, pour ta confiance et pour cette première expérience d'encadrement qui m'ont donné goût à diriger de la recherche.

Enfin mes chaleureux remerciements vont à Leslie Ayagapin qui est la première thèse que j'ai l'honneur de diriger dans ma carrière. Merci Leslie pour nos discussions riches, parfois même salvatrices qui m'ont permis de découvrir une personne intègre sur qui j'ai pu pleinement compter cette année. Bien plus que nos débats, nos échanges riches ont fini par nourrir une amitié sincère et réelle. Un immense merci à toi ! Merci à toutes les deux pour votre confiance, car j'ai conscience que vous avez été en quelque sorte des sujets d'expérimentation de mon rôle de directeur. Merci de votre bienveillance, de votre résilience car vous m'avez conforté chaque jour dans ce choix du métier d'enseignant chercheur que j'ai fait il y a dix ans. À tous, je vous souhaite la plus belle des réussites.

Je souhaite ensuite exprimer mes plus profonds remerciements à toutes ces personnes qui sont chères à mon coeur et qui ont été à mes côtés au quotidien depuis plusieurs années, m'ont appuyée et motivée pour rédiger mon habilitation : Mes parents, beaux-parents, *Nanik*, Willy, Hélène et Xavier – Merci de votre présence et de votre soutien à ma petite famille pour combler mes absences.

Je voudrais remercier mes deux petits amours Maxime et Sarah, pour le bonheur qu'ils ont apporté dans ma vie, pour les parenthèses et les pauses qu'ils m'obligent à prendre pour "respirer" de nouveau.

Enfin, je ne saurais terminer mes remerciements en ne faisant une spéciale dédicace à toi Johane, ma "PE". Merci d'être le relais quotidien de ce vide que je laisse parfois à la maison. Merci de laisser vivre librement cette passion dévorante qu'est la Recherche. Tu sais respecter le silence de mes maux, sans vouloir toujours les questionner, tu sais m'aimer et m'accepter tel que je suis. Et sans que j'ai à te le dire, tu sais quand *"De feu la i brule a moin tro. Tire a moin dan ce feu verse a moin in ti gout' do lo"*.

Avant-propos

L'HABILITATION à diriger des recherches est une étape importante dans la vie scientifique de l'enseignant chercheur. Au-delà de l'exercice de synthèse de mes activités, il s'agit essentiellement pour ma part de faire une pause dans cette course au temps, et d'éclairer mes orientations de recherche à la lumière de mon itinéraire passé.

Le présent mémoire est un exposé synthétique de mon parcours professionnel et de mes travaux de recherche, depuis mon recrutement à l'Université de la Réunion, au sein du laboratoire PIMENT¹ en 2010.

De ma première initiation à la recherche lors d'un stage à l'Université du Kwazulu-Natal (Durban) il y a 20 ans, à mon doctorat sur le rafraîchissement solaire à la Réunion. Mon parcours de chercheur a été l'objet de réorientation thématique au grès des opportunités et des envies. Le fil directeur qui s'est naturellement imposé a été celui de la transition énergétique.

Mes travaux de recherche s'intéressent à l'analyse de données, à la modélisation et à la compréhension de la transition énergétique à différentes échelles. Ces échelles de modélisation peuvent être temporelles allant du système de production instantané d'énergie renouvelable à l'analyse des impacts environnementaux sur le cycle de vie de l'objet d'étude. Ces échelles sont aussi spatiales, car il est primordial de pouvoir comprendre les interactions et les dynamiques territoriales traduisant les signes positifs ou non d'un changement. Ainsi, la notion de transition énergétique a subi, dans ma recherche, un glissement sémantique. Allant de la modélisation des systèmes énergétiques à l'analyse prospective des territoires, cette évolution et ouverture vers de nouveaux champs disciplinaires a été l'occasion de s'éprouver scientifiquement et de se questionner sur de nouvelles orientations stratégiques.

Ce manuscrit est organisé en deux grandes parties. Dans une première, j'y expose en trois grandes rubriques les éléments marquants relatifs à mon parcours :

- Curriculum vitæ ;
- Investissement pédagogique et administratif ;
- Investissement dans l'animation scientifique et d'encadrement.

1. Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie et l'environnement

Dans une seconde partie, je présente une déclinaison de mes travaux de recherche permettant d'éclairer mes nouvelles orientations. Cette articulation permettra de dégager la trajectoire scientifique que je souhaite porter au sein du laboratoire autour de la problématique de la transition écologique. Je présenterai dans un premier temps mes travaux de thèse puis déclinerai autour de chaque chapitre dans les thématiques de la ville durable, de la transition énergétique et de la qualité environnementale des espaces bâtis.

Table des matières

Liste des figures	xv
I Parcours Académique et Scientifique	1
1 Parcours et Curriculum vitae	3
1.1 Parcours	3
1.2 Curriculum Vitae	5
2 Détails des activités pédagogique et collective	11
2.1 Activités d'enseignement	11
2.2 Responsabilités pédagogiques	14
2.2.1 Responsable de la 1 ^{re} année de Licence Génie Civil	14
2.2.2 Responsable de Masters	14
2.3 Promotion de la formation	15
2.3.1 Innovation pédagogique	16
2.3.2 Internationalisation des formations de Master.	18
2.3.3 Projet Européen FESTII	20
2.4 Activités de responsabilité collective	21
2.4.1 Vice-Doyen Formation et Insertion professionnelle au sein de l'UFR SHE	21
2.4.2 Responsabilités au sein de l'Université.	22
2.4.3 Activités hors les murs.	22
2.5 Synthèse	24
3 Détail de mes activités d'animation scientifique	25
3.1 Animation scientifique interne et externe	26
3.1.1 Séminaires de doctorants à l'échelle du laboratoire	26
3.1.2 Thème : Efficacité énergétiques des espaces bâtis (E3B)	26
3.1.3 Organisation de conférences	27
3.1.4 Séjours invités au sein d'équipe de recherche	29
3.1.5 Actions de dissémination et vulgarisation scientifiques	29
3.2 Encadrement de travaux de recherche	30
3.2.1 Encadrement de thèses	32
3.2.2 Direction de thèses	34
3.2.3 Encadrement Post-doctoral	39
3.2.4 Projets de thèses 2021	40

3.2.5	Synthèse encadrement de la Recherche	41
3.3	Production scientifique	45
3.3.1	Introduction générale	45
3.3.2	Revue internationale en évaluation	46
3.3.3	Revue internationale avec comité de lecture	46
3.3.4	Chapitre d'ouvrages	47
3.3.5	Conférences Internationales avec comité de lecture	48
3.3.6	Conférences Nationales avec actes	49
3.3.7	Conférences invitées	50
3.3.8	Symposiums	50
3.3.9	Rapports de projet	50
 II Synthèse des activités de recherche		51
 4 Contexte général		55
4.1	Introduction	55
4.2	Travaux de thèse	57
4.2.1	La production de froid solaire	59
4.2.2	Modélisation et expérimentation	60
4.2.3	Conclusion	69
4.3	Problématique et positionnement de ma recherche	71
 5 Territoires et transition énergétique		75
5.1	Introduction	75
5.1.1	Le contexte national	77
5.1.2	Transition énergétique en milieu insulaire	78
5.1.3	La Réunion, une île en transition énergétique?	78
5.1.4	Madagascar, quelle transition énergétique pour la grande île?	82
5.1.5	Les Comores où comment s'engager enfin vers une durabilité énergétique?	87
5.1.6	Conclusion	92
 6 De l'exploration des données pour analyser les territoires		95
6.1	L'analyse exploratoire de données	95
6.2	Les outils et méthodes	96
6.2.1	L'analyse en composantes principales (ACP)	96
6.2.2	Le "Clustering" ou classification non supervisée	97
6.2.3	Système d'information géographique	98
6.3	L'ACP pour identifier les disparités	99
6.4	Optimisation spatiale par clustering	101

6.5	SIG et Analyse de données	105
6.6	Indicateurs composites	108
6.6.1	Transition dans les PEID	110
6.6.2	Durabilités des pays de l'UE	112
6.7	Synthèse	114
7	Comprendre et construire des territoires en transition	115
7.1	La ville durable	115
7.1.1	Quels enjeux pour un urbanisme durable en milieu tropical?	116
7.2	Quels impacts entre les projets d'aménagement et le territoire?	118
7.3	Mode d'habiter et qualité de vie : indicateur de durabilité.	120
7.3.1	Habiter et durabilité	121
7.3.2	Méthodologie	122
7.3.3	Analyse des données	123
7.3.4	Conclusion	125
7.4	Vers une approche multidimensionnelle de la durabilité	126
7.5	Synthèse	128
8	Approche prospective de la transition énergétique	131
8.1	Introduction	131
8.2	Consommation électrique de Madagascar	133
8.2.1	Méthodologie générale	134
8.2.2	Résultats et discussion	137
8.3	Scénarios par approche prospective	142
8.3.1	OSeMOSYS où l'interopérabilité et la flexibilité de la modélisation	143
8.3.2	Modèle OSeMOSYS pour la Réunion (SARI)	144
8.3.3	Modèle OSeMOSYS pour Madagascar (MAMBA)	148
8.4	Synthèse	152
9	L'analyse environnementale	155
9.1	Introduction	155
9.2	L'analyse de cycle de vie (ACV)	156
9.3	Qualité environnementale des mix électriques en milieu insulaire	160
9.4	La décomposition Kaya-LMDI	162
9.5	Cycle de vie des bâtiments	166
9.5.1	Contexte et méthode	167
9.5.2	Quelle typologie des constructions individuelles à la Réunion	169
9.5.3	Impacts, effet d'insularité et politiques	169
9.5.4	Quelles conséquences pour la politique énergétique?	173
9.5.5	Cycle de vie, déchets et durabilité	174

9.6 Synthèse	176
10 Conclusion et perspectives	179
Bibliographie	183

Table des figures

2.1	Illustration des brochures produites en 2018.	16
2.2	Coopération en formation dans la zone Océan Indien.	19
2.3	Formation à la valorisation scientifique, IST-A Mars 2020.	23
3.1	Conférenciers du colloque TRANSEETER, 2017.	28
3.2	Conférence Rotary Club Saint Pierre/Entre-deux 2019.	31
3.3	Répartition des thèses encadrées ou dirigées selon les thématiques du laboratoire.	32
3.4	Résultats du sondage auprès des doctorants et docteurs encadrés ou dirigés depuis 2015.	43
4.1	Thèmes de recherche portés ces cinq dernières années.	57
4.2	Mix de la production électrique de la Réunion en 2008.	59
4.3	COP et température opérative des différents dispositifs à sorption [Balaras 2007].	61
4.4	Principe du froid solaire à partir d'une machine à absorption liquide .	62
4.5	Comparaison des courbes de rendement du capteur sous vide.	63
4.6	Simulation du modèle à 3 noeuds du capteur sous vide.	64
4.7	Spectre obtenu par la méthode TMA à partir du modèle à 3 noeuds. .	66
4.8	Synoptique de la modélisation de l'installation sous TRNSYS.	67
4.9	(a) Production frigorifique et température en sortie du stock chaud – (b) Comparaison entre la température dans une salle de TD et l'air extérieur.	68
4.10	Données expérimentales du pilote pour la salle de TD4 à l'IUT de la Réunion en 2008.	69
4.11	Trajectoire historique et évolutions tendanciennes de l'élévation de la température de 1960-2100 – source [IPCC 2018].	72
5.1	Évolution historique de la production électrique à la Réunion	79
5.2	Mix de la production d'électricité à la Réunion en 2018.	80
5.3	Taux d'électrification et croissance du PIB de 1990 à 2017, source [Bank 2019b, Bank 2019d].	83
5.4	Structure de la production d'électricité 2017 en GWh, [SIE 2017].	84
5.5	Comparaison du mix électrique des îles de l'Océan Indien : a) GWP et électricité produite, b) Production par sources.	88
5.6	Profil du vent sur l'archipel des Comores.	90

6.1	Evolution de la production électrique en ktep dans les territoires outre mer français.	99
6.2	Biplot ZNI/Variables sur les deux premières composantes principales.	100
6.3	Répartition par IRIS du nombre d'actifs occupés se déplaçant en Transport en Communs (données INSEE RGP 2015)	102
6.4	Résultats des caractéristiques des 26 stations.	103
6.5	Clustering sur les stations de recharge	105
6.6	Synoptique de la méthodologie générale	107
6.7	Résultats de la HCPC sur les stations météorologiques.	107
6.8	Résultats du zonage climatique de Madagascar.	109
6.9	Indice de durabilité des îles	111
6.10	Score de durabilité des pays de l'UE.	113
7.1	Croquis de l'urbanisation concentrique de la Réunion	118
7.2	Cartographie de l'indicateur composite spatiale entre 2006 (A) et 2012 (B) – [Pavadépoullé 2017].	120
7.3	Dendrogramme de la classification hiérarchique descendante.	123
7.4	Cercle du projet du projet de l'ANRU de Ravine Blanche, [Etienne 2017].	127
8.1	Processus de l'approche prospective – adapté de [Julien 1975].	132
8.2	Methodology framework	135
8.3	Décomposition additive de la consommation électrique à Madagascar de 1987 à 2015.	138
8.4	Décomposition à partir de l'année de référence 1987	139
8.5	Production électrique selon tous les scénarios pour 2030.	142
8.6	Différents scénarios définis pour la Réunion.	144
8.7	Time slices du modèle.	145
8.8	Production selon le modèle business-as-usual	146
8.9	Production selon le scénario 1	147
8.10	Production selon le scénario 2	148
8.11	Résultats des mix électriques selon les différents scénarios.	150
8.12	Evolution du cout de production énergétique selon les différents scénarios.	151
9.1	Principe général de l'économie circulaire.	156
9.2	Les quatre étapes de l'analyse de cycle de vie.	158
9.3	Classification des résultats d'inventaire en indicateurs environnementaux et en catégories d'impact.	159
9.4	Processus d'une centrale à charbon à partir de GEMIS	160
9.5	Impacts environnementaux par kWhe [C : Corsica, GP : Guadeloupe, GY : French Guyana, MQ : Martinique, YT : Mayotte, RE : Reunion] – selon [Rakotoson 2017].	162

9.6	Résultats de la décomposition additive des émissions de CO ₂ liées à l'électricité de Madagascar, sur la base de l'année de référence 1990. .	165
9.7	Frontières de nos études en ACV du bâtiment.	167
9.8	Impact des matériaux pour les maisons individuelles selon le GWP. .	168
9.9	Classification des constructions individuelles et collectives de la Réunion.	170
9.10	Comparaison de la distribution du GWP des maisons individuelles. .	171
9.11	Part du mix électrique et du transport dans le ratio de GWP.	172
9.12	Schéma du cycle vie global de la maison.	175

Liste des tableaux

2.1	Principaux enseignements dispensés durant le contrat 2016-2021. . .	13
3.1	Synthèse des publications et communications	45
3.2	Référencement des revues dans lesquelles les articles ont été publiés.	45
5.1	Comparaison du mix électrique 2008 et 2018.	81
5.2	Hydropower potential in Anjouan an Moheli islands.	91
6.1	Identification des variables	103
8.1	Liste des technologies de production d'électricité	145
8.2	Performance et cout des technologies – selon (IRENA)	149
9.1	Les normes ISO associées à l'ACV.	157
9.2	Definition des effets de la LMDI	164

Première partie

**Parcours Académique et
Scientifique**

Parcours et Curriculum vitae

Sommaire

1.1 Parcours	3
1.2 Curriculum Vitae	5

CE chapitre présente dans un premier temps et de façon chronologique mon cursus professionnel à la suite de mon doctorat en collaboration avec le secteur public et privé. Il sera abordé dans mon CV une lecture de mes activités administratives et pédagogiques. Enfin, sera évoqué mes activités liés à la formation à et par la recherche.

1.1 Parcours

Ma thèse de doctorat s'est effectuée au sein du laboratoire PIMENT de l'Université de la Réunion de 2003 à 2007. Les activités de notre unité de recherche se placent dans le contexte particulier des Zones Non-Interconnectées (ZNI) visant une autonomie énergétique et disposant d'un fort potentiel en ressources renouvelables. L'unité s'intéresse donc à la fois à la maîtrise de la demande en énergie au sein des bâtiments, quartiers ou villes, mais également à décarboner le mix électrique de la Réunion. Mes travaux de thèse sur le rafraîchissement solaire se sont inscrits dans ce second axe thématique.

A la suite de ma thèse en 2007, j'ai été ATER¹ en physique au sein du département de Sciences du Bâtiment et de l'Environnement. Au cours de cette même année, je me suis associé à deux autres docteurs du laboratoire pour créer un bureau d'études en acoustique, énergie et environnement. À ce titre, j'ai occupé un statut de consultant au sein de cette entreprise durant six années. Cette expérience professionnelle a été particulièrement marquante. En effet, cela a été pour moi une opportunité de travailler sur une étude particulière qui a été celle de l'impact acoustique du tracé de

1. Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche

la route des Tamarins et de la définition du programme de réhabilitation des habitats sensibles. Durant l'année universitaire 2008, j'ai occupé un poste de PRAG² contractuel au sein du département Génie Civil de l'IUT de la Réunion. Lors de cette année, j'ai été Directeur des études de la 1^{re} année de DUT Génie Civil.

En 2010, j'ai été recruté en tant que maître de conférences en mécanique et énergie (CNU60) au département Sciences du Bâtiment et de l'Environnement au sein de l'UFR SHE³. Âgée de 12 ans seulement, cette UFR est la plus jeune de l'université de la Réunion et regroupe pour l'heure quatre départements de formation. Lors de mon recrutement, j'ai été rattaché au laboratoire PIMENT EA 4518, dont les axes de recherche s'articulent autour des systèmes énergétiques, le bâtiment et la ville, et les mathématiques appliquées. Initialement, mon activité de recherche était orientée sur les aspects de modélisation de systèmes énergétiques renouvelables, et par conséquent mon thème de prédilection était celui de l'énergie. Tout en gardant et en maintenant mon intérêt pour les énergies renouvelables, j'ai opéré une digression dans mon approche de la transition énergétique, afin de mettre plus en lumière les enjeux autour de cette problématique à une échelle territoriale. Ce travail a été développé, depuis six ans, en collaboration avec une chercheuse en urbanisme du laboratoire afin d'avoir une approche pluridisciplinaire de la transition et de croiser les angles d'analyse. Notre approche est plutôt celle de l'évaluation et de la compréhension des dynamiques de transition en partant de l'hypothèse que l'ingénierie associée aux systèmes de production renouvelable est à ce jour acquise depuis plusieurs années. Ma reconversion thématique m'a également amené à m'investir et à développer un ensemble d'enseignements autour de la prospective dans un parcours de formation en lien avec l'urbanisme. Ce rapprochement sur de nouvelles thématiques a été l'occasion également d'élargir ma coopération scientifique aussi bien en enseignement qu'en recherche. Je me suis intéressé à de nouveaux objets d'étude dans la zone Océan Indien en particulier à Madagascar, Maurice et les Comores. Dans la partie qui suit, seront exposées les principales lignes de mes différentes activités au sein de l'Université. Le détail de ces éléments sera repris dans les chapitres suivants.

2. Professeur Agrégé

3. Unité de formation et de Recherche des Sciences de l'Homme et de l'environnement

1.2 Curriculum Vitae

JEAN PHILIPPE PRAENE

né le 29/06/1976 à Saint-Pierre (Réunion)–Marié, 2 enfants

Maître de conférences en Mécanique, 6^e échelon, CNU 62

Spécialité : Energie et Environnement **UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION**

Laboratoire **PIMENT** – EA 4518

117 rue du Général Ailleret, 97430 Le Tampon

– **FORMATION**

- 2003-2007 **DOCTORAT** ès Sciences Physiques – spécialité Génie des procédés, soutenue à l'Université de la Réunion, Titre : **Intégration et modélisation de composants d'un système de rafraîchissement solaire couplé au bâtiment.**
- 2001 **DEA** Mécanique et Énergétique, INPL de Nancy – Université de la Réunion
- 2000 **MAÎTRISE** de Physique et Applications - Université de la Réunion
- 1999 **LICENCE** Sciences Physiques, spécialité chimie – Université de la Réunion

– **EXPÉRIENCE PROFESSIONNELLE**

- 2010-2020 **MAÎTRE DE CONFÉRENCES**, Laboratoire PIMENT, Université de la Réunion
- 2007-2013 **INGÉNIEUR D'ÉTUDE** en confort thermique, acoustique et environnement, Bureau d'études AIEE, Le Tampon
- 2008-2009 **ENSEIGNANT CONTRACTUEL**, Conservatoire des Arts et Métiers : Thermodynamique, Energies renouvelables, Le Port
- 2008-2009 **ENSEIGNANT AGRÉGÉ CONTRACTUEL**, Département Génie Civil, IUT de la Réunion
- 2003 **CHARGÉ D'ÉTUDES**, Cabinet Louis Lengrand et Associés, Paris
- 2002 **ENSEIGNANT CONTRACTUEL** Physique/Chimie, Académie de la Réunion
- 1999 **ASSISTANT DE RECHERCHE** (Stage de recherche de 5 mois) University of KwaZulu Natal - Afrique du Sud
- 1999 **ENSEIGNANT CONTRACTUEL** Lycée Lislet Geoffroy - Académie de la Réunion

✂ – THÈMES DE RECHERCHE

- 2004-2012 *Rafraîchissement Solaire* : (i) Etude de capteurs solaires thermiques; (ii) Modélisation thermodynamique et couplage de systèmes de production; (iii) Expérimentation et banc d'essais de capteurs.
- 2012-présent *Diagnostic et Analyse territoriale* : (i) Etude de potentiel de production d'énergies renouvelables; Caractérisation des profils de consommation territoriaux; (iii) Analyse de Cycle de Vie.
- 2016-présent *Analyse de données / Scénarios* : (i) Analyse factorielle et classification; (ii) Construction d'indicateurs composites de durabilité; (iii) Développement d'outils / Modélisation de scénarii énergétiques.
- 2018-présent *Prospective* : (i) Approche prospective de la transition énergétique; (ii) Création de scénarios.

⬠ – RESPONSABILITÉS SCIENTIFIQUES ET ADMINISTRATIVES

- **Doyen** de l'UFR Sciences de l'Homme et de l'Environnement, Université de la Réunion, 2020-2024;
- **Membre élu au conseil** de l'UFR, Université de la Réunion, 2020-2022;
- **Vice-Doyen Formation et Insertion Professionnelle** de l'UFR Sciences de l'Homme et de l'Environnement, Université de la Réunion, 2013-2020;
- **Animateur** de la thématique Efficacité Énergétique des Bâtiments et des Quartiers du laboratoire PIMENT, depuis 2019 (nouvelle Direction du laboratoire);
- **Membre du conseil** du laboratoire PIMENT, collège B, (2015-2020);
- Référent offre de formation du domaine Sciences Technologie et Santé, pour l'UFR SHE – 2019 et 2014;
- Membre représentant de l'UFR SHE au Conseil Académique de l'Université de la Réunion, depuis 2013;
- Président de jury de bac lycées français Antananarivo (2014)–Johannesburg (2019);
- Élu représentant de l'UFR SHE au bureau de la COFIP⁴ depuis 2017;
- Référent CESAME de l'UFR SHE, Université de la Réunion, 2013-2015;
- **Représentant des doctorants** au conseil de Laboratoire PIMENT (2007 – 2010);
- Membre du Conseil de département de Sciences du Bâtiment et Environnement, depuis 2010.

4. Commission de l'Orientation et de la Formation à l'Insertion Professionnelle

Responsabilités Pédagogiques

- Responsable pédagogique du M2 Ville et Environnements Urbains, Dpt. SBE, depuis 2016 ;
- Responsable pédagogique de M2 Génie Civil et Urbanisme parcours EBENE⁵, IST Antananarivo - Madagascar, depuis 2011 ;
- Responsable pédagogique de M1 Physique du Bâtiment et Environnement, 2013-2015 ;
- Responsable pédagogique du L1 Génie Civil Mécanique, 2010 – 2013 ;
- Directeur d'études Génie Civil, 1^{re} année, IUT de la Réunion, 2008 – 2009.

– ANIMATION ET ÉVALUATION SCIENTIFIQUE _____

▼ Évaluation scientifique

- **Président** du Comité Scientifique du projet Européen FESTII (2020-2023).
- Membre du comité scientifique des Journées Scientifiques de l'ESPA, Madagascar 2020 ;
- Scientific Committee member of the **3rd International Conference on Energy, Environment and Climate Change**, Mauritius on 2-4 July 2019 ;
- Membre du comité scientifique des Journées de la Recherche des IST⁶ de Madagascar, depuis 2017 ;
- Expert consultant en énergie renouvelable pour le Mauritius Renewable Energy Agency, depuis 2018 ;
- Expert pour l'évaluation des projets de recherche de la **King Fahd University**, Arabie Saoudite, depuis 2013.

Reviewer pour les journaux : Applied Energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Environmental Development, Applied Thermal Engineering, Recent Patents on Mechanical Engineering, Building Simulation, Energies, Buildings (MDPI), Environment and Planning B, Utilities Policy.

▼ Coopération scientifique

- Dépôt d'un projet Erasmus avec University of Mauritius 2020-2023, en cours ;

5. Espaces Bâti, ENvironnement et Energie

6. Institut Supérieur Technologique

- Coopération projet **Modeling of Island Energy Systems**, HFT⁷ Stuttgart - Allemagne, 2019;
- Montage d'un consortium de recherche "Island studies", coopération en University of Delaware, UCL⁸, University of Mauritius - 2020;
- ERASMUS+ Programme, Centre for Urbanism & Built Environment Studies, **University of Witwatersand** – South Africa, 2019-2021;
- **Visiting professor**, Dpt. of the Chemical & Environmental Engineering - University of Mauritius, depuis 2018;
- Conférencier invité, Congrès International sur les Plasmas et l'Energie, Antananarivo, 2012 : "Towards a net zero energy island";
- Enseignant invité, Département Génie Industriel, IST Antananarivo, depuis 2017.

▼Participation aux projets de recherche

- Projet Hubert Curien REDUIT - University of Mauritius : Social investigation on the perception and acceptability of reinforced composite products from lignocellulosic materials such as bio-based plastics in Mauritius and Reunion Islands to substitute conventional plastic (2019-2020);
- MAROONER, FEDER Région : Modélisation de la perception sociale des ENRs / Qualité de vie (2018-2020);
- TRANSEETER (2017-2018), La transition énergétique, à l'épreuve des territoires, Projets incitatifs – Université de la Réunion;
- RESET (2017-2021), Regional energy transition network : Etude de la transition énergétique dans les îles du sud-ouest de l'Océan Indien (University of Antananarivo, University of Mauritius);
- ANR EQUIPEX DURASOL (2014), Instrumentation de dispositifs énergétiques renouvelables;
- ANR MeGaPICS : Méthodes pour Garantir les Performances des installations de Climatisation et de chauffage Solaire (2011 - 2013);
- ANR ORASOL : Optimisation de procédés de rafraîchissement solaire (2006 – 2010);
- Projet ADEME RAFSOL : Mise en oeuvre d'un pilote de rafraîchissement solaire par absorption. (2008)

7. Hochschule für Technik Stuttgart

8. University College of London

▼Participation à des jurys de thèse

- Thèse en énergétique de Mamy Harimisa Radanielina : Conversion d'énergie par un dispositif de gazéification de la biomasse : du système au potentiel territorial, 2018, Institut de Maîtrise de l'Énergie - **Université d'Antananarivo, Madagascar** ;
- Thèse en aménagement du territoire et urbanisme de Pierre Rivière : Analyse du retour d'expérience et optimisation de la recherche opérationnelle maîtrise d'ouvrage pour les quartiers durables en milieu tropical, 2017, Université de la Réunion ;
- Thèse en Génie civil, environnement et Urbanisme de C. Hoarau : Contribution à l'analyse de la qualité environnementale d'un projet d'aménagement périurbain/rural en milieu tropical - Méthodes et outils d'aide à la décision, 2017, Université de la Réunion ;
- Thèse en Génie Civil et énergétique de Bruno Malet Damour : Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaire appliqués au bâtiment : expérimentation, modélisation et validation, 2016, Université de la Réunion ;
- Thèse en Mécanique et Environnement de N. Voavy Rakotonarivo : Développement des outils d'analyse des flux (énergie , matière , déchets) d'un espace bâti et à différentes échelles d'observation, 2013, Université de la Réunion ;
- Thèse en Mécanique et Environnement de P. Jaohindy : Modélisation des systèmes éoliens verticaux intégrés aux bâtiments : Modélisation du couple production / Bâtiment, 2012, Université de la Réunion.

▼Participation Comité de sélection

- Membre du comité de sélection MCF CNU 74, Département STAPS, Université de la Réunion, 2019 ;
- Membre du comité de sélection MCF CNU 24, Laboratoire PIMENT, Université de la Réunion, 2017 ;
- **Président** du comité de sélection MCF CNU 24, Université de la Réunion, UFR SHE, 2013 ;
- Membre du comité de sélection MCF CNU 60/62, Université de la Réunion, IUT de Saint Pierre, 2012 ;
- Membre du comité de sélection MCF CNU 62 - n° 4013 (0048 – GESUP), Université de Corse/ IUT, 2012.

Détails des activités pédagogique et collective

Sommaire

2.1 Activités d'enseignement	11
2.2 Responsabilités pédagogiques	14
2.2.1 Responsable de la 1 ^{re} année de Licence Génie Civil	14
2.2.2 Responsable de Masters	14
2.3 Promotion de la formation	15
2.3.1 Innovation pédagogique	16
2.3.2 Internationalisation des formations de Master.	18
2.3.3 Projet Européen FESTII	20
2.4 Activités de responsabilité collective	21
2.4.1 Vice-Doyen Formation et Insertion professionnelle au sein de l'UFR SHE	21
2.4.2 Responsabilités au sein de l'Université.	22
2.4.3 Activités hors les murs.	22
2.5 Synthèse	24

UNE des facettes importantes de la vie du maître de conférences est son implication dans la vie communautaire universitaire. Cela est d'autant plus vrai et nécessaire que les structures UFR, département et laboratoire sont relativement jeunes. Ce chapitre s'attache donc à présenter les axes que j'ai pu développer depuis mon recrutement en 2010 en enseignement au sein mon département de rattachement et mon implication dans la vie universitaire dans mon UFR.

2.1 Activités d'enseignement

Mes activités d'enseignement ont débuté dès mon doctorat au sein du département Génie Civil de l'IUT de la Réunion, SBE¹ ainsi qu'au CNAM. Lors de mon

1. Sciences du Bâtiment et de l'Environnement

recrutement en 2010, je suis passé du contexte pédagogique d'un IUT, cadré par un PPN² et un public sélectionné, à celui d'une faculté, où le challenge est de pouvoir capter l'intérêt des étudiants de première année et de les accompagner sur la voie de la réussite en licence.

La jeunesse de mon département de rattachement (SBE), m'a permis de m'impliquer dès le départ dans la vie et le développement de ce dernier. En effet, le département a été créé en 2006 et comptait lors de mon recrutement cinq titulaires. L'offre de formation proposant deux parcours en licence et deux mentions de Master, j'ai ainsi été dès mon recrutement en responsabilité pédagogique, et ce, jusqu'aujourd'hui.

Initialement recruté pour des enseignements dans le domaine du solaire, mes enseignements se sont ouverts au champ plus général des *Énergies renouvelables*. À ce jour, je coordonne les enseignements de la L1 au Master 2 sur les questions des énergies renouvelables. En collaboration avec le Professeur Harry Boyer, nous organisons également les enseignements autour de la *Thermique* et de la *Conception bioclimatique*. L'essentiel de mes enseignements s'effectue au sein de ma faculté. Le tableau 2.1 ci-dessous résume les principaux enseignements dispensés dans les différentes années de formation en moyenne par année. Depuis 2010, ma charge d'enseignement est de l'ordre de 330 HTD par an. Ce volume important s'explique par le déficit dans le taux d'encadrement d'enseignants chercheurs au sein de notre département. Toutefois, j'ai pu réduire mes heures d'enseignement à moins de 300 h depuis 2018.

L'ensemble des enseignements listés dans le tableau 2.1 ont été entièrement créés, car ils n'étaient pas forcément présents dans la précédente accréditation de l'offre de formation sous le même format. Le renforcement de ma recherche, ces dernières années en lien avec l'urbanisme, m'a également permis de m'ouvrir à des enseignements avec ce champ de recherche. Ces cours ont été l'occasion de créer un lien entre les cours d'énergétique souvent orientés sur les systèmes de production et le territoire concerné.

Outre les enseignements classiques, notre métier d'enseignant nous amène à encadrer bon nombre d'étudiants. Durant ces neuf années, j'ai encadré chaque année trois à cinq stages d'un niveau L3 à M2 par an, aussi bien les parcours urbanisme ou génie civil. Les stages de recherche ont été pour moi les premières expériences d'accompagnement et de formation d'étudiants par la recherche. Les thématiques de stage sont liées à mes champs de recherche et de ce fait essentiellement orientées autour de la thématique de l'énergie. De plus, le suivi des stagiaires m'a permis d'une part de détecter de futurs candidats potentiels pour une poursuite en doctorat. J'ai ainsi pu initier cinq thèses de 2014 à aujourd'hui à partir de ces encadrements de stage.

2. Programmes pédagogiques nationaux

TABLE 2.1 – Principaux enseignements dispensés durant le contrat 2016-2021.

Diplôme	Année	Intitulé	CM	TD	TP
Licence GC	L1	Transferts thermiques	8	10	
	L1	Energies renouvelables	10	10	10
	L2	Programmation		10	
	L2	Thermique	10	10	
	L3	Outils de modélisation		18	
	L3	Energie et territoire	8	12	12
	L3	Systèmes énergétiques		40	
	L3	Rayonnement thermique	12	24	
Master VEU	L3	Préparation au stage		8	
	M1 VEU	Diagnostic du territoire	4	12	
	M2VEU	Infrastructures urbaines	4	4	
	M2VEU	Projet		15	
	M2VEU	Analyse de cycle de vie		12	
	M2VEU	Initiation à la recherche		12	
	M2 VEU	Energy Modelling		12	
Master GC	M1 GC	Préparation Stage		10	
	M1 GC	Energies Renouvelables		16	
	M1GC	Thermodynamique		16	
	M2GC STP	Initiation à la recherche		15	
	M2 GC	Renewable Energy	6	6	
	M2 EBENE	Outils de modélisation	10	10	
	M2 EBENE	Analyse de cycle de vie	10	10	
	M2 EBENE	Acoustique	10	10	
SUFP	M2 EBENE	Renewable Energy	10	10	
	Licence PRO	Culture Energétique	10	10	
IUT	Licence PRO	Solaire thermique	6	12	

2.2 Responsabilités pédagogiques

Mon implication pédagogique m'a amené à prendre dès mon année de stage une responsabilité pédagogique, celle de la L1. Au fil des années, malgré quelques recrutements et des mobilités internes vers notre département, j'ai occupé d'autres responsabilités au niveau des parcours ou mention de notre offre de formation.

2.2.1 Responsable de la 1^{re} année de Licence Génie Civil

Dans le cadre de ma mission de responsable pédagogique de la L1 j'ai dû :

- coordonner et préparer l'emploi du temps de la L1 ;
- constituer et gérer l'équipe pédagogique (chargés de cours, enseignants chercheurs, professionnels...);
- assurer l'accueil et lien tout au long de l'année avec les étudiants ;
- faire la promotion de la formation dans les lycées et différentes manifestations pédagogiques (JPO³ ...);
- mettre en place des dispositifs d'aide à la réussite des étudiants ;
- initier et développer de nouveaux environnements pédagogiques innovants.

2.2.2 Responsable de Masters

À la suite de mes premières responsabilités sur la mention de licence Génie Civil, j'ai accompagné la consolidation de nos formations de niveau Master à la Réunion, Madagascar et beaucoup plus récemment à l'île Maurice.

Au niveau des masters, j'ai d'abord occupé la fonction de responsable du M1 Génie Civil, suite au départ d'un collègue au sein de l'équipe de direction de l'établissement. Cela m'a permis de renforcer essentiellement le réseau de professionnels intervenant dans la formation, mais également de faire véritablement le lien dans l'optique d'une insertion professionnelle de nos étudiants.

En 2007, nous avons délocalisé à l'Institut Supérieur d'Antananarivo un parcours du M2 Génie Civil orienté sur le bâtiment, l'énergie et l'environnement. J'ai repris cette coopération avec l'IST en 2011 à la suite du Professeur Gatina. Le laboratoire entretient avec Madagascar un partenariat de recherche depuis plus de 20 ans. L'objectif de cette formation délocalisée est de permettre aux étudiants de suivre à Madagascar un cursus de l'Université de la Réunion. Mon rôle au sein de ce master a été essentiellement d'animer une équipe pédagogique franco-malgache, trouver les financements de soutien de la formation afin de la pérenniser. Ces aspects de projets seront exposés

3. Journées Portes Ouvertes

dans le paragraphe suivant. Le modèle de cette formation va évoluer progressivement au cours de l'année 2021. En effet, notre master était pour l'heure proposé à part des autres formations dispensées au sein de l'IST. Le passage de Madagascar au système LMD nous amène à repenser notre offre et à la faire évoluer au sein d'un parcours proposé aux étudiants de l'IST dans le cadre de leur ingénierat.

Enfin mes nouvelles orientations en recherche m'ont tout naturellement conduit à m'impliquer plus grandement dans la mention de Master Ville et Environnements Urbains dont je suis responsable de la 2^e année. Les missions sont les mêmes que celle des autres masters, avec un accent particulier de la promotion et la structuration des enseignements en lien avec les différents acteurs de l'aménagement et de l'urbanisme du territoire (Communes, EPCI⁴Bureaux d'études...). Ce lien avec les collectivités doit encore se développer, car notre formation n'est pas forcément connue de tous. Toutefois, les stages de Master et la qualité des étudiants sont propices au développement de cette publicité.

De façon commune à l'ensemble des parcours chaque année, nous devons intervenir sur un certain nombre d'actions de la vie collective pédagogique à savoir :

- Les commissions de recrutement (VAE, Admission Post Bac, Campus France...);
- Jury de délibération semestriels;
- Commission de perfectionnement;
- Rédaction et suivi des statistiques de l'insertion professionnelle des étudiants de Masters;
- Suivi des projets de promotion (colloque, table ronde...) et stagiaires, organisation des soutenances;
- Participation à l'évaluation quadriennal des formations et rédaction de la nouvelle offre de formation.

2.3 Promotion de la formation

En comparaison avec les autres facultés et département de l'université, notre département compte parmi les cinq derniers créés au sein de notre institution. De ce fait, il nous est nécessaire et important de maintenir un travail de terrain auprès des lycéens afin de porter à connaissance cette offre de formation qui touche à des enjeux d'actualité et de société. Notre offre de formation nécessite d'assurer un flux conséquent d'étudiants du fait des nombreux parcours possibles. Notre enjeu majeur est donc de porter à connaissance des lycéens l'existence de cette offre qui sort des canaux classiques de type physique ou génie civil.

Depuis mon recrutement, j'ai produit à plusieurs reprises différents supports de pro-

4. Établissement public de coopération intercommunale

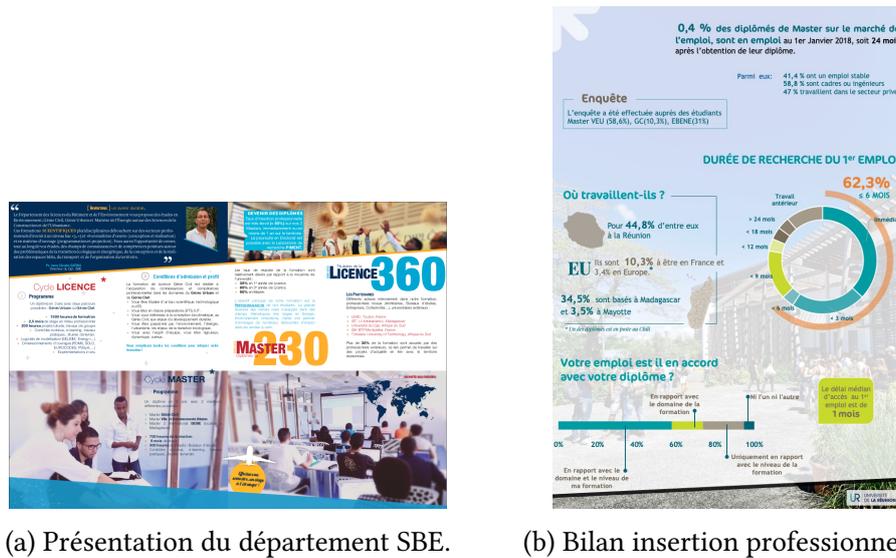


FIGURE 2.1 – Illustration des brochures produites en 2018.

motion de notre département pour des manifestations internes ou externes. Les documents portent à la fois sur la présentation d'une mention formation, des débouchés et détails y afférant, mais également sur les données à remonter lors des bilans Hcéres⁵. A titre illustratif, la Figure 2.1 présente un visuel d'exemple de documents que j'ai pu produire.

2.3.1 Innovation pédagogique

Les enseignements que je dispense aujourd'hui sont tous liés à la question de l'énergie et de la transition énergétique approché selon plusieurs axes. Ma formation doctorale ne m'ayant pas spécifiquement préparée à l'enseignement, cet apprentissage a dû se faire au contact d'enseignants agrégés ou certifiés plus aguerris que moi sur la pédagogie. Cette formation m'a amené à remettre en question mes formes d'apprentissage académiques classiques afin de m'ouvrir à d'autres approches pédagogiques, plus efficaces. Ces nouveaux outils me permettent en particulier de m'adapter à un public étudiant dont le profil a beaucoup évolué et dont les apprentissages au lycée ont beaucoup évolué.

"REUNION IS SPEAKING" – A cet égard, j'ai porté au sein du département différents projets. Certaines évaluations ont pris la forme de concours dans le cadre par exemple de la semaine du développement durable. J'ai mis en place un challenge où les étudiants ont été amenés à créer une vidéo de sensibilisation à l'impact de l'activité humaine sur l'île de la Réunion. Les productions des étudiants ont fait l'objet d'un challenge, prix et communications. Les résultats de cette UE sont visibles entre

5. Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur

autre à l'adresse suivante, <http://bit.ly/30auoen>.

"PROJET CAPTAIN"⁶ – J'ai été durant deux ans porteur d'un projet au sein de l'UFR d'innovation des pratiques pédagogiques. L'objectif était de progressivement faire évoluer notre forme traditionnelle d'enseignement (CM & TD) vers une forme plus dynamique. Nous nous sommes appuyés sur la création de contenus interactifs, sur une pédagogie active... Notre objectif portait sur la réorganisation de la temporalité et l'activité d'apprentissage reposant sur quatre socles :

- Classes inversées ;
- Plateformes de ressources pédagogiques ;
- Communauté d'apprentissage ;
- Travaux de terrain.

Ainsi la récente crise sanitaire du COVID-19, a amené l'Université de la Réunion à accélérer le processus de digitalisation des enseignements, et de mobiliser les compétences et outils autour de l'enseignement distanciel. Cette approche, je l'ai envisagée il y a environ cinq ans pour répondre à un besoin grandissant dans les enseignements que j'ai pu dispenser. En effet, les formations délocalisées dans la zone Océan Indien ainsi que les demandes des apprenants de pouvoir disposer de plus de temps pour pouvoir assimiler les cours et prendre du recul m'a amené à progressivement inverser mes approches pédagogiques. Ainsi aujourd'hui mes enseignements se font partiellement à distance en particulier les CM⁷. Cela m'a permis de changer radicalement mes interactions avec les étudiants. Ainsi, j'ai privilégié les temps d'assimilation des cours en asynchrone. Les temps de regroupement en amphithéâtre ont permis de mettre des temps d'échange avec les étudiants. Cette approche hybride m'a permis d'aller plus loin avec les étudiants. Ainsi sur la promotion de L1 Génie Civil dans mes UEs le taux de réussite a pu augmenter de 15% en 3 ans d'expérimentation du projet CAPTAIN.

"BOOTCAMP" – Toujours dans l'optique d'un apprentissage asynchrone au rythme de l'étudiant, j'ai mis en place au sein du département SBE, sous la plateforme Moodle de l'université de la Réunion un espace d'apprentissage des outils. L'objectif a été de rassembler en un seul endroit l'ensemble des ressources concernant les outils et logiciels proposés par les enseignants tout au long du cursus des cinq années de formation. La plateforme permet ainsi aux étudiants de se remettre à niveau à tout moment, ou de perfectionner leur acquis par des podcasts complémentaires hors programme d'enseignement. Cela me permet de mieux appréhender l'hétérogénéité de mes cohortes d'étudiants.

6. Communauté d'APprenTissage Actif et INteractif

7. Cours Magistraux

2.3.2 Internationalisation des formations de Master.

Depuis sa création en 2006, le département SBE a toujours eu à coeur de développer ses relations dans la zone Océan Indien. Historiquement, nous avons entretenu depuis les années 90 une coopération soutenue avec les collègues de Madagascar dans le cadre de la formation doctorale. Depuis 2006, cette coopération de recherche s'est étendue à nos formations de Master.

Dans le cadre, de mes responsabilités pédagogiques de Master, j'ai été en charge de plusieurs projets visant à améliorer le volet internationalisation de notre offre de formation. Notre département entretient depuis de nombreuses années des échanges en formation et recherche dans la zone Océan Indien. Je me suis investi dès le départ pour développer un partenariat fort initié avec Madagascar, plus récemment nous avons ouvert d'autres pistes avec Maurice, les Comores et l'Afrique du Sud. La Figure 2.2 présente une vue d'ensemble des principales coopération de formation auxquelles j'ai participé au sein du département SBE. Les lignes en pointillées désignent des coopérations qui sont actuellement en phase de projet et non encore validées.

Les projets de soutien à l'internationalisation de nos formations visent deux objectifs. D'une part pour des raisons propres au contexte socio-économique des territoires, nous avons souhaité délocaliser nos formations à l'étranger. La 2^e année master Génie Civil parcours *EBENE* a été délocalisé depuis 2007 à Antananarivo. D'autre part, il s'agit de renforcer et diversifier le profil de l'équipe pédagogique afin d'offrir à nos étudiants un panel large d'intervenants spécialisés sur les questions de la transition énergétique, la production de la ville, de l'environnement...

"MASTER EBENE" – Ce master est à l'heure le seul qui est délocalisé à l'étranger. Cette délocalisation date de 2007, et se poursuit toujours avec Madagascar. Je suis porteur porteur du **projet AUF (40 k€)** pour le financement de mobilités d'enseignants et de stagiaires à l'étranger sur une durée de 3 ans, **Le projet Mobilité ERASMUS+** a permis de renforcer les liens de coopération de formation entre les enseignants de notre département et ceux des écoles du Génie Civil et Génie Industriel de l'IST d'Antananarivo. Le programme actuellement en cours permet l'accueil de doctorants et étudiants en Master sur six mois. Ce projet d'un montant de **80 k€** sera reconduit normalement sur la période 2021-2024. Un des objectifs était le renforcement de l'intervention des enseignants et des formations des deux institutions. J'ai entre autre également accompagner les étudiants de Master de l'IST et du département de Physique de l'université d'Antananarivo dans la préparation aux auditions et dossiers scientifiques pour les bourses BGF⁸ de l'ambassade de France d'Antananarivo.

"PROJET WITS UNIVERSITY" – Je suis co-porteur avec le Dr. D. Fakra du projet Erasmus+ Mobilité Internationale de Crédits qui vient d'être validé durant l'année 2019. Cette collaboration vise aux développements de la collaboration en formation

8. Bourses du gouvernement français

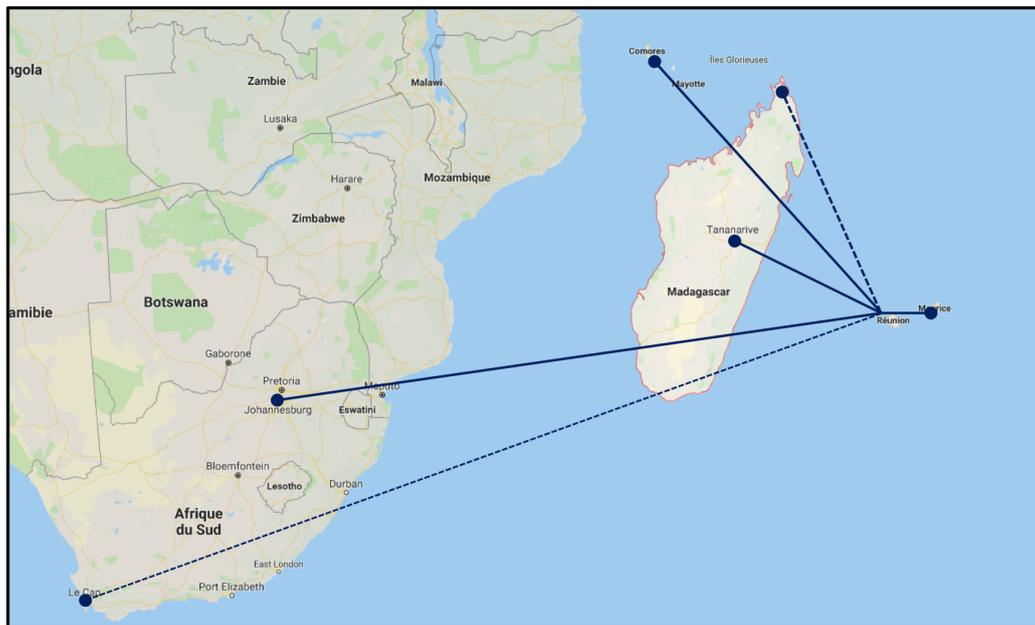


FIGURE 2.2 – Coopération en formation dans la zone Océan Indien.

avec le département Génie Civil mais également les échanges en recherche avec le laboratoire CUBES⁹ qui travaille sur les problématiques de la ville. Ce projet se déroulera jusqu'en 2022 et démarre en octobre 2019. Nous avons ainsi souhaité étendre le réseau de coopération à un autre pays de la zone Océan Indien afin de diversifier et de permettre l'intégration d'enseignants anglophones dans nos unités d'enseignement.

"MASTER GÉNIE CIVIL, PARCOURS STRUCTURES ET TRAVAUX PUBLICS" – J'ai participé au montage et à la mise en œuvre d'une seconde délocalisation de notre Master GC à l'Université des Mascareignes de Maurice. Ce parcours s'intéresse à une montée en compétences et une offre plus étayée pour nos étudiants dans le domaine du génie civil, avec une ouverture sur les enjeux environnementaux. Ce récent partenariat nous permet de poser un peu plus le rayonnement du département SBE dans la zone OI.

Outre mon implication dans le montage des précédents projets, je m'implique toujours dans le développement de la coopération régionale en formation et recherche. Le département SBE a délocalisé depuis 2019, la 3^e année de licence de GC parcours SE3B à l'Université des Comores. Dans le cadre de cette formation, j'interviens sur des modules de formation en lien avec l'étude des systèmes énergétiques renouvelables. Nous ouvrons également les deux années du parcours EBENE, au sein desquels j'assurerai toujours des cours dans le cadre de la planification énergétique, et des énergies renouvelables.

9. The Centre for Urbanism and Built Environment Studies

Enfin, dans le cadre d'une collaboration initiée en recherche avec University of Mauritius sur des travaux de recherche sur les milieux insulaires, j'ai souhaité étendre nos échanges également au cadre de la formation. Le projet est actuellement en dépôt dans le cadre d'un échange ERASMUS de 36 mois. L'objectif de ce programme est de faire en sorte que certaines UEs du Master VEU, soient dispensées entièrement en anglais. D'autre part, il s'agit pour nous d'une montée des compétences en anglais et de nous familiariser à d'autres pratiques pédagogiques étrangères.

2.3.3 Projet Européen FESTII

Mon implication dans l'internationalisation de notre offre de formation m'a également ouvert à de nouvelles opportunités de coopération dans le domaine de l'enseignement transfrontalier. A ce titre, j'ai intégré cette année le projet FESTII¹⁰ qui regroupe un consortium d'établissements issus de six pays différents :

- Madagascar [2];
- Maurice [2];
- Comores [1];
- Açores [1];
- Laguna [1];
- La Réunion [1];

L'objectif de cette action est de renforcer les capacités des établissements à produire un enseignement dans le domaine des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en adéquation avec les besoins du marché et de la société. De plus, ce projet s'adjoint également l'ambition de la définition d'une stratégie et d'une réglementation régionale des politiques énergétiques au niveau de l'Océan Indien. A l'instar de ce qui est observé dans les pays de l'ACP¹¹, i.e. une massification de l'enseignement supérieur et le faible accès à des opportunités de financement a amené la mise en œuvre de ce consortium à la demande de la Commission de l'Océan Indien (COI). Le projet est piloté par le bureau de l'océan indien de l'AUF¹² pour une durée de 36 mois jusqu'à janvier 2023, pour un montant total maximum de l'ordre de **700 k€**.

10. Formation et Enseignement Supérieur pour la Transition énergétique dans les territoires Insulaires et en Indianocéanie

11. Afrique, Caraïbes, Pacifique

12. Agence Universitaire de la Francophonie

2.4 Activités de responsabilité collective

2.4.1 Vice-Doyen Formation et Insertion professionnelle au sein de l'UFR SHE

J'ai été nommé Vice-Doyen depuis 2013 au sein de l'UFR SHE. J'ai assuré cette responsabilité sur les mandatures de deux différents doyens, Pierre Leroyer et Dominique Morau. Cette fonction a été l'occasion de participer aux instances centrales de l'Université afin d'y présenter et défendre les dossiers de notre composante tout au long de ces sept années. Les plus gros chantiers que j'ai eus à coordonner au sein de l'UFR ont été deux bilans de l'offre de formation et deux accréditations de NOF¹³. Ma tâche a été à la fois d'accompagner les départements dans la mise en œuvre de leur bilan en produisant et synthétisant des données au sein de notre composante. Mais surtout, de construire avec les équipes pédagogiques la NOF, en mettant en place un schéma cohérent du développement de l'UFR. Ainsi dans cette nouvelle offre 2020-2024, notre projet au sein de la SHE a été de développer deux aspects fondamentaux qui constituent notre ADN qui font écho aux axes stratégiques de l'UR¹⁴ :

- RAYONNEMENT : L'offre de formation de la SHE s'est étoffée de nombreuses formations délocalisées (Comores, Madagascar, Maurice). Ainsi, nous avons porté un projet ambitieux qui est celui de renforcer la coopération dans l'Indiano-céanie. Ce renforcement de notre rayonnement se fait par la délocalisation de notre offre, l'accueil d'étudiants et de chercheurs de la zone, le déplacement de nos étudiants lors d'école de terrain dans la zone. Toutefois ce rayonnement ne se limite pas à l'Océan Indien mais concerne le monde entier, par le biais de programme ERASMUS TROPIMUNDO de la BEST-T du Département d'Écologie Terrestre ou encore le Master Français langues étrangères, qui rassemblent des étudiants du monde entier, et qui a la particularité d'être entièrement à distance.
- FORMATION CONTINUE : Faisant écho aux sollicitations des acteurs de notre territoire, plusieurs formations de niveau Licence Pro et Master ont été portées par notre composante. J'ai pu ainsi défendre et présenter l'importance de ce déploiement de la FTLV¹⁵ en cohérence avec notre ambiance d'un ancrage territorial fort de notre offre de formation continue. Notre politique a été depuis la création de l'UFR un développement inclusif avec l'ensemble des acteurs politiques et professionnels de notre territoire répondant à une réalité professionnelle locale et nationale.

Enfin hormis ces moments forts dans la stratégie de développement de notre UFR

13. Nouvelle Offre de Formation

14. Université de la Réunion

15. Formation Tout au Long de la Vie.

que sont les NOF ou bilan de formation, ma fonction m'a permis au quotidien de rencontrer les étudiants de tout bord, lors de nombreux salons de l'éducation ou journées d'informations dans les lycées. J'ai participé ainsi en tant que Vice-doyen à la promotion des formations de l'UFR SHE, auprès des étudiants aussi auprès de décideurs politiques et autres entreprises qui accueillent de plus en plus les étudiants issus de nos formations.

2.4.2 Responsabilités au sein de l'Université.

Depuis 2013 je représente l'UFR SHE dans différentes instances centrales de l'Université. Ainsi, je participe au conseil académique ainsi qu'à la CFVU¹⁶, en tant que vice doyen depuis 2013. Mon rôle a été de défendre les projets portés au sein des départements de notre UFR. L'un des éléments clé fort de ma mission a été de coordonner les bilans et les nouvelles offres de formation de l'UFR SHE. J'ai ainsi participé aux différents groupes de travail (COPIL, COtech) permettant de fixer le cadre des différents bilans ou projets.

J'ai été également nommé durant une année membre du conseil de l'ESPE. Depuis 2017, je suis élu au bureau de la COFIP¹⁷. Cette commission accompagne des projets internes à l'UR, visant à une professionnalisation des étudiants à tous les niveaux. Nous avons ainsi accompagné le financement de projets de type doctorale, challenges, journées de rencontres entreprises, séminaires de formation avec des professionnels etc...

2.4.3 Activités hors les murs.

Les fonctions de maître de conférences nous confèrent un certain nombre de missions en dehors de l'UR. Ainsi tous les deux ans, je préside les jurys de bac dans les lycées français. J'ai présidé les jurys de bac des lycées de Saint Paul IV (Réunion), lycée français d'Antananarivo (Madagascar) et Johannesburg (Afrique du Sud). Je suis également depuis 2019, membre des jurys projet de fin d'étude à l'ENSAM¹⁸ - antenne de la Réunion. Depuis quelques années, l'ENSAM de la Réunion a mis en place ses parcours de Masters ouvrant sur des spécialités de recherche. J'interviens donc pour l'évaluation des mémoires et des soutenances des étudiants architectes ayant choisi une orientation vers le doctorat. Cette collaboration a tout son sens du fait que je travaille en recherche sur un certain nombre de questions en lien avec l'aménagement et l'urbanisme. Nos collaborations sont amenées à se développer dans

16. Conseil de la Formation et la Vie Étudiante

17. Commission de l'Orientation et de la Formation pour l'Insertion Professionnelle

18. École Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier

le temps, notamment dans le cadre de la formation de Master 2 Ville et Environnements Urbains dont je suis responsable. Je participe également à la préparation à l'oral de l'agrégation STI2D, avec le référent régional. J'interviens essentiellement sur les dossiers d'étude de cas en lien avec les enseignements de thermodynamique et de transferts thermiques. L'objectif est de permettre à l'étudiant de formaliser un cadre théorique solide à la problématique qu'il aura défini. L'exercice consiste ainsi de tester les connaissances que le candidat devra mobiliser autour de la modélisation des systèmes énergétiques.

J'ai assuré également des enseignements et formation au sein du CNAM¹⁹ à la Réunion. J'ai dispensé une UE de thermodynamique et froid industriel sous la direction de l'IFFI-CNAM²⁰.

Dans le cadre des programmes d'échange ERASMUS MIC, j'enseigne chaque année une formation à destination des doctorants et jeunes chercheurs de différentes institutions de recherche de Madagascar (Université d'Antananarivo, ESPA²¹ IST Ambohitra, IST Antananarivo). Comme l'illustre les images de la Figure 2.3, ces formations se déroulent sous forme d'atelier de plusieurs jours.

J'ai été sollicité pour une formation des doctorants et jeunes chercheurs de l'IST d'Antananarivo. La formation s'organise en différents temps qui peuvent prendre



FIGURE 2.3 – Formation à la valorisation scientifique, IST-A Mars 2020.

la forme de conférences afin d'illustrer les rendus et les attendus au niveau des re-

19. Conservatoire National des Arts et Métiers

20. Institut français du froid industriel

21. Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo

vues scientifiques ou de congrès internationaux. D'autres temps sont consacrés à la mise en pratiques des outils et méthodes abordés avec les stagiaires. Cet appui a permis notamment de préparer les doctorants aux sessions posters et présentations aux journées de la recherche des IST et journées des ESPA. Nous avons suite à cette expérience commencer des « capsules » permettant la formation a distance. Je proposerai ainsi une formation entièrement à distance d'un volume de 40h environ qui permettra aux jeunes doctorants de se familiariser à l'ensemble des outils en lien les travaux de recherche : bibliographie, édition graphique, anglais, éditeur \LaTeX , infographie, moteur de recherche...

2.5 Synthèse

Durant ces dix premières années dans ma carrière d'enseignant-chercheur au sein de l'UR, j'ai dû relever plusieurs challenges pédagogiques en fonction de mon département d'appartenance. En effet, le cadre d'un IUT, régi par un PPN m'a permis dans un premier temps de mettre en place et de consolider mes enseignements dits classiques tels que la thermique ou la thermodynamique à un niveau licence. Cette première étape plus qu'intéressante, m'a surtout été utile dans l'optique de développement de formations non-tubulaires. J'ai pu ainsi maintenir une interaction permanente avec d'autres champs, dans mon cas à l'IUT de la Réunion, il s'agissait de l'énergie et du génie civil. En 2010, lorsque j'ai rejoint le département SBE, les enjeux et challenges étaient tout autres. Nous étions une petite équipe pédagogique dont l'ambition a été de forger une offre transdisciplinaire autour des enjeux de la construction durable en milieu tropical, de l'énergie et de l'environnement. Ainsi, ce challenge m'a offert l'opportunité d'expérimenter différentes approches pédagogiques innovantes afin de m'adapter au mieux aux différents publics d'apprenants. Le département a toujours eu une approche liée avec le monde du Génie Civil et de l'Urbanisme au sein de son offre de formation. La jeunesse de notre département exige une implication forte de son équipe pédagogique dans les responsabilités et autre activités externes de promotion de nos formations. Bien que très chronophages, ces activités demeurent très enrichissantes, et m'ont permis de faire le lien entre les différents services de l'université et nos besoins quotidiens d'enseignant. Enfin l'un des points forts auquel je participe, et que je continue de développer est le renforcement de notre coopération régionale. En effet, notre département est aujourd'hui le premier de l'UR en termes de formations délocalisées, et d'internationalisation des formations. Nous avons été depuis ces trois dernières années lauréat de six programmes ERASMUS+ de formation avec les pays de l'Indianocéanie. Cette coopération a d'autant plus sens qu'elle trouve écho dans les axes stratégiques de la politique de notre établissement autour du rayonnement de l'UR dans l'Indianocéanie.

Détail de mes activités d'animation scientifique

Sommaire

3.1 Animation scientifique interne et externe	26
3.1.1 Séminaires de doctorants à l'échelle du laboratoire	26
3.1.2 Thème : Efficacité énergétiques des espaces bâtis (E3B)	26
3.1.3 Organisation de conférences	27
3.1.4 Séjours invités au sein d'équipe de recherche	29
3.1.5 Actions de dissémination et vulgarisation scientifiques	29
3.2 Encadrement de travaux de recherche	30
3.2.1 Encadrement de thèses	32
3.2.2 Direction de thèses	34
3.2.3 Encadrement Post-doctoral	39
3.2.4 Projets de thèses 2021	40
3.2.5 Synthèse encadrement de la Recherche	41
3.3 Production scientifique	45
3.3.1 Introduction générale	45
3.3.2 Revues internationales en évaluation	46
3.3.3 Revues internationales avec comité de lecture	46
3.3.4 Chapitre d'ouvrages	47
3.3.5 Conférences Internationales avec comité de lecture	48
3.3.6 Conférences Nationales avec actes	49
3.3.7 Conférences invitées	50
3.3.8 Symposiums	50
3.3.9 Rapports de projet	50

Au moment de mon recrutement au sein du laboratoire PIMENT, un certain nombre de changements organisationnels allait s'opérer autour de la restructuration des thématiques de recherche. J'ai pu ainsi prendre part à cette

transition, qui a été pour moi également l'occasion de me questionner sur les axes de recherche que je souhaitais porter dans le futur. Ainsi, dès le début de mon recrutement, j'ai pu participer à l'animation scientifique du laboratoire en interne et en externe. Bien que le laboratoire dispose d'une certaine reconnaissance régionale et nationale, il demeure important de toujours valoriser les travaux menés.

Les différentes actions ont eu pour principal intérêt de garder le lien avec les acteurs du domaine de l'énergie et de l'environnement du territoire réunionnais, et de porter à leur connaissance les compétences développées localement, à un niveau national et international. Les conséquences des actions ont essentiellement permis d'augmenter notablement les collaborations de recherche avec les entreprises et collectivités locales à travers des thèses CIFRE, consortium de projet ou encore contrat post-doctoral. La mise en place de ces coopérations a contribué à assurer un rayonnement scientifique autour des projets portés par des acteurs réunionnais dans le domaine de l'aménagement, de l'énergie et de l'environnement.

3.1 Animation scientifique interne et externe

3.1.1 Séminaires de doctorants à l'échelle du laboratoire

L'une de mes premières implications en amont de mon recrutement et qui se sont poursuivies durant l'année de stage a été la mise en place d'un espace d'échange entre doctorants. En effet, j'ai initié au sein du laboratoire les séminaires entre doctorants, qui avaient été repris par la suite par la nouvelle direction dans un cadre plus formel. L'objectif de ces séminaires était d'encourager la formation des doctorants sur des outils utiles à tous, dans le cadre des travaux de thèse. De plus, cet espace d'échange nous a permis également de prendre mieux connaissance des différentes thèses en cours au sein du laboratoire. La direction du laboratoire à part la suite officialisée cette action par une rencontre mensuelle. À ce jour, ces séminaires permettent également aux doctorants de cumuler des crédits durant les trois années de thèse. Ma participation aux séminaires a porté sur l'aide à la préparation de poster pour l'assemblée générale du laboratoire ou congrès internationaux. J'ai également mis en place un atelier de "Team Building" avec les doctorants afin de travailler sur la cohésion du groupe, mais aussi une approche ludique de bilan de compétences.

3.1.2 Thème : Efficacité énergétiques des espaces bâtis (E3B)

Dans le cadre de la nouvelle direction du laboratoire PIMENT, j'assume la responsabilité depuis cette année 2020 de l'animation scientifique de ce thème. Ainsi, nous effectuons deux à trois réunions annuelles, permettant dans un premier temps

d'échanger sur les grandes échéances de l'année en terme de projet et de développement de la recherche. Il s'agit également d'effectuer une veille des travaux en cours en permettant aux collègues de présenter leurs travaux en cours et échanger sur les pistes d'évolution possible. L'objectif de ce travail d'animation est aussi d'encourager les approches transdisciplinaires et le dépôt de nouveaux projets de recherche. Enfin, l'un des éléments clé est la discussion sur les orientations stratégiques du thème. En effet, l'objectif est de se placer dans la perspective d'un bilan à fournir dans le cadre d'une évaluation, et, de réfléchir d'ores et déjà aux orientations à porter en cohérence avec notre thème. Ces réflexions sont d'autant plus importantes qu'elles font aujourd'hui se côtoyer des thématiques historiques du laboratoire tel que la thermique du bâtiment, ou le confort avec des thématiques plus récentes que sont l'urbanisme, l'environnement, la qualité environnementale des espaces bâtis, les matériaux biosourcés, etc. La nécessité de la mise en œuvre d'une stratégie autour d'une recherche interdisciplinaire avait été déjà souligné lors du rapport d'évaluation du laboratoire en 2014. Ainsi, ma mission dans ce thème est de permettre le glissement progressif des collaborations via une approche multiscalair de l'habitat et de l'habiter en milieu tropical. Cela nous permettra à terme, de mobiliser et développer l'ensemble des compétences nécessaires à notre thème qui à ce jour ambitionne d'aborder les enjeux de recherche autour du bâtiment, du matériau, des usagers en allant jusqu'au quartier, la ville et son environnement.

3.1.3 Organisation de conférences

Outre les congrès nationaux ou internationaux auxquels je participe régulièrement dans le cadre de mes travaux, j'ai eu l'opportunité de prendre part à l'organisation de différents colloques au sein du laboratoire PIMENT ou à l'extérieur. A la fin de ma thèse, j'ai pu participer à l'organisation de la conférence IBPSA France qui s'était déroulé à l'IUT de la Réunion. J'avais ainsi pris part à la préparation des supports de communication et également être dans l'équipe d'accueil et d'assistance des conférenciers. Depuis mon recrutement j'ai pris part à quatre conférences, que je détaille ci-dessous :

- [TRANSEETER, 2017] - "*Transition énergétique à l'épreuve des territoires*"
Nous avons initié ce colloque conjointement avec le laboratoire CEMOI¹ de l'Université de la Réunion en 2006. Ce colloque a réuni des chercheurs, des acteurs publics, professionnels et nos étudiants de Master 2 VEU durant deux jours sur des thématiques en lien avec la transition énergétique, voir Figure 3.1. Avec ma collègue Fiona Bénard, nous avons monté le projet, et organisé l'ensemble des éléments de communication. Le colloque a donné lieu à des conférences en matinée et des ateliers l'après-midi sur la ville durable tropicale,

1. Centre d'Economie et de Management de l'Océan Indien

la vulnérabilité en milieu insulaire, etc.

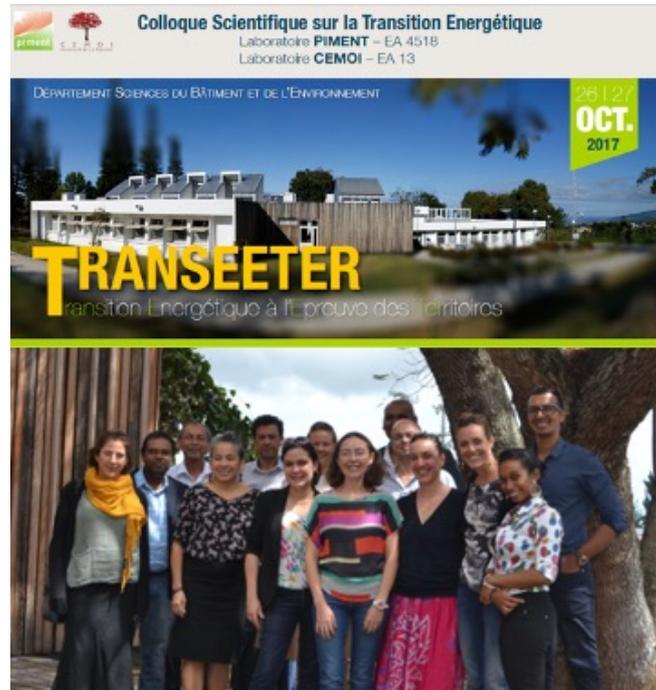


FIGURE 3.1 – Conférenciers du colloque TRANSEETER, 2017.

- [ICEECC, 2019] - *"International Conference on Energy, Environment and Climate Change"*
 Dans le cadre de colloque, j'ai fait partie du comité scientifique international, j'ai ainsi évalué les propositions de communications dans le domaine de l'énergie et de la vulnérabilité des îles. En marge du colloque, j'ai été sollicité pour participer au montage d'un nouveau consortium qui est actuellement proposé auprès de l'UNDP². Ce consortium réunira des chercheurs internationaux qui travaillent sur les différents aspects de la vulnérabilité des territoires insulaires et des stratégies à mettre en œuvre afin de faire face aux effets du changement climatique.
- [JRI, 2017-2020] - *"Journées de Recherche des IST de Madagascar"*
 Outre mon implication dans le comité scientifique, j'ai animé un atelier sur le thème des énergies renouvelables et la transition énergétique. J'ai été également amené à présenter une conférence sur l'analyse de données au service de la compréhension des dynamiques territoriales. Ces journées de recherche m'ont également permis d'organiser en parallèle des workshops avec les institutions partenaires et les chercheurs malgaches afin de fédérer du montage

2. United Nations Development Programme

de consortium dans l'Océan Indien. J'ai pu ainsi à la fois présenter le bilan de projet franco-malgache (EBENE financé par l'AUF), mais également discuter des contours des futurs appels à projets.

– **JSESPA, 2021** - "*Journées Scientifiques de l'ESPA*"³

Je participe au sein du comité dans les phases de préparation du colloque, ainsi que la préparation d'une conférence sur la transition énergétique en milieu insulaire. De plus, j'ai évalué plusieurs articles pour le colloque et préparer les doctorants lors d'une première formation en mars 2020 à la communication scientifique.

3.1.4 Séjours invités au sein d'équipe de recherche

Depuis 2017, j'ai initié une coopération de recherche avec le Dpt. of the Chemical & Environmental Engineering - University of Mauritius (UoM). Ainsi, je collabore avec le Dr. Dinesh Surroop sur les problématiques de transition énergétique dans les îles et avec le Dr. Pratima Jeetah, sur les questions environnementales à partir de l'analyse de cycle de vie, et de l'étude de la perception des usagers sur de nouvelles pratiques. J'ai séjourné à trois reprises à l'UoM. Deux de mes séjours m'ont permis de me former et de développer le modèle OSEMOSyS pour la Réunion. Le troisième séjour a permis de rédiger un projet sur les îles africaines qui vient d'être validé par le ministère mauricien. Depuis 2018, j'ai le statut de **Visiting Professor** au sein de l'UoM.

Je suis également chercheur invité aux départements de Génie Industriel et Génie Civil de l'IST d'Antananarivo depuis 2014. Notre collaboration porte aujourd'hui sur des travaux initiés sur l'analyse de cycle de vie de matériaux innovants, et de l'étude des systèmes de production énergétiques renouvelables à Madagascar. Depuis 2018, avec le Dr. F. Bénard, nous avons ouvert le champ de nos collaborations aux thèmes de recherche en lien avec l'aménagement et l'urbanisme. En effet, la capitale Antananarivo, est un terrain d'étude particulièrement intéressant du fait de son contexte socio-économique et de dynamique territoriale importante (en particulier son étalement urbain).

3.1.5 Actions de dissémination et vulgarisation scientifiques

3.1.5.1 Forum et salon des métiers

Depuis mon recrutement, je participe chaque année à des forums des métiers, salon de l'étudiant pour présenter à la fois notre offre de formation et le métier d'enseignant-chercheur dans le domaine de l'énergie. Mes interventions se déroulent

3. Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

à la fois dans les lycées pour sensibiliser les futurs bacheliers aux opportunités du métier de chercheur, mais également à des regroupements organisés par le rectorat. En 2016, j'ai également participé au salon de l'enseignement supérieur à Antananarivo. L'objectif de présenter plus largement les débouchés que propose l'UR dans le domaine de sciences technologie et santé.

Parallèlement aux salons, j'ai participé aussi aux Fêtes de la Science. L'objectif de mener des actions de sensibilisation auprès du grand public sur les problématiques de la transition écologique, mais également, la présentation d'application et d'application pratiques en lien avec les énergies renouvelables.

3.1.5.2 Dissémination scientifique

INTERREG V – Dans le cadre du programme de coopération régionale de l'Europe, nous avons présenté une synthèse des travaux associés à la thèse de ma doctorante Mme Rasamoelina à la **Région Réunion**.

FORUM RÉGIONAL DES ÉNERGIES DURABLES – En 2019, j'ai été invité pour proposer une conférence sur les enjeux sociétaux de la transition énergétique dans l'Indianocéanie. J'ai pu ainsi présenter des travaux de recherche conjoints entre Madagascar et la Réunion sur la prospective énergétique dans des territoires insulaires intitulé : *"Des énergies fossiles aux énergies renouvelables : tour d'horizon et scénario à long terme de Madagascar"*. Ce forum nous a été également l'occasion de rencontres de nombreux acteurs locaux et internationaux sur les enjeux de la transition en milieu insulaire.

VULGARISATION GRAND PUBLIC – Chaque année, je participe au sein de différentes associations ou collectivités à des opérations de vulgarisation scientifique de mes thématiques de recherche. J'ai ainsi été invité au Rotary Club Saint Pierre/Entredeux pour une conférence sur la transition énergétique, voir Figure 3.2. Cette intervention m'a permis d'étendre mon réseau d'acteurs locaux dans le secteur socio-économique et politique. Cela a eu pour fruit immédiat de me permettre des nouveaux contacts rapides qui aboutissent en ce moment en la finalisation de différents projets de thèse. En 2021, une conférence sera proposée à Antananarivo en partenariat avec l'Alliance Française, sur la thématique de l'analyse de cycle de vie appliqué au secteur de la construction et de l'énergie.

3.2 Encadrement de travaux de recherche

Dans cette partie, je n'ai pas listé volontairement les encadrements annuels effectués au niveau Master ou L3. En effet, étant l'enseignant référant sur les questions de l'énergie, je suis souvent sollicité pour suivre les étudiants en stage. J'assure ainsi



FIGURE 3.2 – Conférence Rotary Club Saint Pierre/Entre-deux 2019.

chaque année le rôle de tuteur pédagogique pour les stagiaires en énergie, mais également en urbanisme. De plus, je propose systématiquement deux ou trois sujets de recherche de niveau master. Compte tenu du volume trop important d'étudiants encadrés en dix ans, je retiens pour les stages proposés que ces stages m'ont permis de travailler avec des candidats qui présentaient un profil intéressant pour une poursuite en thèse de doctorat. Ainsi, j'ai pu mettre en place cinq thèses et deux projets actuellement en cours en dix ans.

Ainsi cette partie ne sera consacrée uniquement aux thèses et contrat post-doctoral. Les thèses que j'ai initiées sont essentiellement en lien avec deux parcours de formation ; le Master VEU (Réunion) et le Master Génie Civil parcours EBENE (Madagascar). Ainsi les sujets qui seront abordés ci-dessous traitent des trois aspects de mon travail de recherche : l'énergie, l'environnement et les espaces bâtis.

Dans le cadre des différents programmes de coopération de type ERASMUS + , Financement AUF ou encore les bourses BGF⁴ j'encadre également des étudiants de tout horizon, à titre d'exemple :

- J'ai accueilli deux étudiants de 5^e année à l'EIVP⁵. L'objet de leur stage avait été pour l'un l'étude des régions ultrapériphériques de l'Europe et pour l'autre la stratégie de développement des énergies renouvelables pour la transition énergétique de la Réunion ;
- J'ai travaillé également durant neuf mois avec Maxime KAUFF de l'Université des Sciences appliquées de Trèves sur "Perception et acceptabilité des énergies renouvelables par la population de l'île de la Réunion" ;
- J'ai accueilli également plusieurs étudiants ingénieurs ou en Master pour des

4. Bourses du Gouvernement Français

5. École des ingénieurs de la ville de Paris

stages de recherche niveau bac + 5, sur des thèmes liés à l'analyse de données ou encore la modélisation de la production énergétique renouvelable à l'échelle d'un système ou d'un territoire.

3.2.1 Encadrement de thèses

J'ai eu l'opportunité d'encadrer quatre thèses, dont la direction était assurée par Pr. J.C. Gatina et le Dr HDR L. Adelard (thèse de V.R. Rakotoson). Parmi ces thèses, une a déjà été soutenue en 2018. Ces encadrements sont représentatifs de la porosité existante dans mes travaux de recherche entre les deux équipes thématiques du laboratoire : Bâtiment et Énergie. J'ai résumé dans la Figure 3.3, l'ensemble des thèses que j'ai encadrées ou dirigées. Comme le montre le schéma, les thèmes des différents sujets de thèse reposent sur les deux thématiques du laboratoire et sont même transversaux dans certains cas au deux (*thèses de L. Ayagapin & V. Russeil*).

Les financements de ces thèses reposent sur cinq types de financement :



FIGURE 3.3 – Répartition des thèses encadrées ou dirigées selon les thématiques du laboratoire.

- FEDER ;
- INTERREG ;
- ADEME ;
- CIFRE ANRT ;
- Higher Education Commission of Mauritius.

▼**Vanessa Rolande RAKOTOSON** – INTÉGRATION DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE DANS L'ÉTUDE DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE EN MILIEUX INSULAIRES.

Financement : INTERREG [Région Réunion] – Laboratoire PIMENT - Université de la Réunion, **Taux d'encadrement 90%**, (soutenue le 7 Décembre 2018) – [HAL-Thèse](#).

RÉSUMÉ – Le développement d'un territoire induit a bien des égards une augmentation de la consommation électrique : développement économique, intensité énergétique des ménages, etc. Sous la pression de ces dynamiques territoriales, une réponse immédiate a été le recours aux ressources fossiles pour produire cette énergie. Cela demeure encore vrai pour le cas particulier des territoires insulaires tel que la Réunion. La loi de transition énergétique pour la croissance verte a imposé aux territoires ultramarins d'atteindre l'autonomie énergétique en 2030, avec le passage une étape intermédiaire de 50% pour 2020. Ainsi, ces travaux de thèse ont eu pour principal objectif de construire une approche prospective de la Réunion à l'aune des contraintes de limitation des émissions de gaz à effet serre pour la production et distribution de l'électricité. À partir de l'analyse de cycle de vie et suivant les normes ISO 14044, les centrales de production d'électricité du territoire sont évaluées sous différents impacts environnementaux. La démarche adoptée a été de mettre en place un outil d'évaluation adapté à tout territoire, permettant d'identifier les étapes et les processus fortement contributeurs pour la production de 1 kWh électrique. Les résultats de ce diagnostic servent de points de repère pour élaborer les scénarios de production, établis dans une démarche de modélisation prospective. Huit scénarios proposés ont été développés pour répondre aux contraintes environnementales, techniques, sociales et économiques.

▼**Kelvin PAVADÉPOULLÉ** – INTERACTIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES DES PROJETS URBAINS SUR UN TERRITOIRE - CAS DE LA RÉUNION.

Financement : FEDER [Région Réunion] – Laboratoire PIMENT - Université de la Réunion, **Taux d'encadrement 20%**, 2017.

RÉSUMÉ – Depuis une quinzaine d'années, les quartiers dits "durables" fleurissent sur l'ensemble du territoire. La plupart des travaux de recherche actuels s'intéressent plus aux effets internes de projets et n'observent que rarement les interactions ou effets avec les espaces adjacents. Ainsi, cette thèse a pour ambition d'évaluer à travers une analyse multidimensionnelle des quartiers les différentes interactions entre un projet et son environnement immédiat. Pour ce faire des approches croisées sont utilisées allant d'enquêtes de terrain, en passant par l'analyse de données spatiales à l'échelle du quartier iris ou encore des interviews d'acteurs publics. Deux projets d'aménagement sur l'ensemble de leurs aires urbaines à l'île de La Réunion ont servi de terrain d'analyse, sur la période 2006 – 2016. Le premier projet est l'opération ANRU de Ravine Blanche à Saint-Pierre; le second est le projet ex nihilo d'une Zone d'Aménagement Concerté de Beauséjour, à Sainte-Marie (ZAC Beauséjour), nommé au label national « ÉcoQuartier ».

▼**Eve ETIENNE** – APPROCHE COMPRÉHENSIVE DES PROJETS D'AMÉNAGEMENT DURABLES EN MILIEU INSULAIRE : APPLICATION À LA RÉUNION.

Financement : FEDER [Région Réunion] – Laboratoire PIMENT - Université de la Réunion,

Taux d'encadrement 30%, 2017.

RÉSUMÉ – Construire et produire la ville durable en milieu tropical insulaire questionnent immédiatement sur la reproductibilité des processus importés d'ailleurs et mis en œuvre à cette fin. Les contraintes géographiques fortes ou encore une croissance démographique soutenue sont à titre d'exemple des caractéristiques différenciant les espaces continentaux de ces territoires insulaires. Ainsi, cette thèse s'attache à questionner la façon d'aménager durablement un territoire tropical insulaire, en tenant compte et préservant ses spécificités. Pour ce faire, deux verrous scientifiques font l'objet d'une investigation toute particulière : La première de construire une méthodologie adaptée au contexte et identifier quels outils et informations faut-il mobiliser pour la compréhension de notre problématique. La seconde est d'observer à travers la définition des typologies de sites existants dans la littérature, si cela induit une topologie des projets d'aménagement. Ainsi, le travail effectué dans le cadre de cette thèse repose sur une analyse de type *text mining* des documents d'urbanisme, des projets et de la littérature. Ce travail est complété par des travaux d'entretien ainsi que de l'analyse exploratoire de données permettant de poser un diagnostic objectif de la situation des territoires étudiés.

▼**Ludovic FONTAINE** – **LA GESTION ET LA VALORISATION DES DÉCHETS MÉNAGERS ET ASSIMILÉS DANS LES TERRITOIRES INSULAIRES – VERS UNE TERRITORIALISATION DU POTENTIEL DES DÉCHETS**

Financement : FEDER [Région Réunion] – Laboratoire PIMENT - Université de la Réunion, **Taux d'encadrement 30%**, 2018.

RÉSUMÉ – La question de la gestion des déchets est une problématique importante pour toutes collectivités territoriales, mais elle est plus encore dans un contexte insulaire. En effet, ces territoires diminués spatialement et ayant des caractéristiques complexes présentent avant tout des qualités majeures pour réaliser et résoudre le problème que représente le déchet. La présente thèse se propose d'évaluer le potentiel des déchets ménagers et assimilés, parce que, de par leurs spécificités ces déchets présentent un fort potentiel de valorisation énergétique. Il a ainsi pour objectif d'une part d'accroître tout d'abord l'efficacité des collectivités vis-à-vis de sa responsabilité en tant que gestionnaire des déchets et d'autre part de contribuer à l'effort de " recentrage " de ce potentiel dans le territoire, mais aussi dans le but de contribuer plus globalement à la résolution des problèmes liés à la gestion des déchets dans les territoires insulaires.

3.2.2 Direction de thèses

Lors de mon inscription en HDR, j'ai eu l'opportunité de m'engager également dans une démarche de direction de thèse. Ainsi, je me suis clairement positionné en m'engageant dans des différentes directions de thèses, en demandant une dérogation pour un non-HDR. Ces directions illustrent aujourd'hui clairement mon positionnement de recherche qui sera détaillé dans la partie 2 de ce manuscrit. En effet, mon objectif dans la formation par la recherche est d'accompagner les pays de la zone Océan Indien dans le développement de nos axes de recherche communs. Je me suis donc orienté lors de l'inscription de ma première direction de thèse, celle de Leslie AYAGAPIN, à soutenir mon HDR avant décembre 2021.

Actuellement, je dirige trois thèses à l'Université de la Réunion et je co-dirige deux thèses à University of Mauritius et une dernière l'IST d'Antananarivo. Les travaux de thèse que je porte témoignent directement des interactions que j'ai avec des acteurs publics ou professionnels dans le domaine de la transition écologique. Ces thèses témoignent également de ma volonté forte depuis plusieurs années d'initier un axe fort de coopération scientifique dans l'Indianocéanie. La co-direction de ces thèses avec Madagascar ou Maurice s'intègre systématiquement dans des projets de recherche en cours. L'objectif est d'inscrire ces coopérations dans le temps et les maintenir comme axe stratégique de recherche dans l'océan indien, qui ne se contraint pas uniquement par la durée du doctorat.

▼**Leslie AYAGAPIN** – ANALYSE DE LA QUALITÉ ENVIRONNEMENTALE D'UN QUARTIER-IRIS EN MILIEU TROPICAL INSULAIRE : UNE APPROCHE MULTI-SCALAIRE

Financement : ANRT [Fibres Industries Bois] – Laboratoire PIMENT - Université de la Réunion, **Taux d'encadrement 80%**, 2018. Co-direction : **Pr. Harry Boyer – UR.**

RÉSUMÉ – L'activité anthropique induit aujourd'hui une pression importante sur l'environnement. Les engagements de la France dans le cadre de sa loi LTECV⁶ visent à réduire ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2030. Dans le secteur de la construction qui compte parmi les plus émissifs, l'ambition est d'atteindre un niveau de performance énergétique et environnementale conforme au modèle de bâtiment E⁺/C⁻⁷ pour l'ensemble du parc de logements à 2050. L'objectif de cette thèse est de mettre en œuvre un outil de simulation et d'analyse de la qualité environnementale des espaces bâtis, au service des politiques publiques et professionnels locales, aussi bien en phase de conception qu'en phase de fonctionnement. À partir de la méthodologie de l'analyse de cycle de vie, ces travaux questionnent la notion d'impact environnemental dans un premier temps. Toutefois, l'analyse du secteur de la construction s'entrevoit par une approche plus holistique incluant les problématiques d'économie circulaire, des enjeux sociétaux en lien avec l'emploi, mais également la fin de vie des matériaux avec la valorisation des déchets du bâtiment.

▼**Rindrasoa Miangaly RASAMOELINA** – MODÉLISATION PROSPECTIVE ET ANALYSE SPATIALE : SCÉNARIOS DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE DES ÎLES DU SUD-OUEST DE L'OCÉAN INDIEN

Financement : INTERREG [Région Réunion] – Laboratoire PIMENT - Université de la Réunion, **Taux d'encadrement 80%**, 2019. Co-direction : **Pr. Hery Tiana Rakotondramiarana – Université d'Antananarivo.**

RÉSUMÉ – Actuellement, réussir la transition énergétique dans le cadre de l'atténuation du changement climatique et du développement est un objectif fixé par de nombreux pays. De ce fait, diverses études ont été menées pour analyser les futurs possibles de la production et la consommation énergétique. Cependant, ces derniers étant principalement focalisés sur les régions continentales, il n'existe pas de modèle énergétique générique qui puisse répondre pleinement aux problèmes de planification énergétique des zones isolées. Compte tenu de cela, cette thèse se propose d'élaborer une méthode de planification

6. Loi de transition énergétique pour la croissance verte

7. Bâtiments à Énergie Positive et Réduction Carbone

énergétique multidimensionnelle particulièrement adaptée aux milieux insulaires en tenant compte des spécificités et des contraintes de ces territoires sur l'échelle spatio-temporelle. Les travaux de recherche analysent le cas des îles de la Région Océan Indien. Les spécificités de ces îles mettent en exergue la nécessité de considérer deux cas d'étude : la grande île (Madagascar) et les petites îles (La Réunion, Mayotte, Seychelles, Maurice, Comores). La thèse revêt à la fois un enjeu stratégique et un enjeu méthodologique : « Dans quelles mesures initier et assurer la transition énergétique tout en répondant au développement durable dans les milieux insulaires? Comment intégrer les dimensions économiques, sociales, environnementales et spatiales dans les modèles de planification électrique des milieux insulaires? »

▼ **Valentin RUSSEIL** – CO-CONSTRUCTION D'UNE PROSPECTIVE TERRITORIALE POUR L'APPUI AUX POLITIQUES PUBLIQUES SUR L'AUTONOMIE ALIMENTAIRE ET ÉNERGÉTIQUE DE L'ÎLE DE LA RÉUNION.

Financement : **ADEME** – Laboratoire PIMENT - Université de la Réunion, **Taux d'encadrement 50%**, 2019. Co-direction : **Pr. Jean Philippe TONNEAU – UMR TETIS CIRAD.**

RÉSUMÉ – Dans un contexte général de réflexions croissantes autour des notions d'autonomie alimentaire et énergétique, l'action à l'échelle des politiques de planification territoriale apparaît de plus en plus pertinente. Territoire ultramarin français, La Réunion est une île où les enjeux autour de ce sujet sont accrus : isolement géographique, importante hétéronomie en ressources, pression démographique forte et un foncier contraint. Une approche par la modélisation systémique semble ici nécessaire pour envisager des trajectoires possibles du territoire au regard de sa capacité propre à faire face à une demande alimentaire et énergétique en augmentation. En amont, un diagnostic des liens entre autonomie énergétique et alimentaire ainsi qu'une première évaluation de la prise en charge en termes de politiques publiques du sujet permet de définir un état initial de la modélisation. La modélisation est basée sur un logiciel d'analyse spatiale adapté à la prospective territoriale : Ocelet. In fine, la modélisation et les scénarios obtenus offrent une base pour de l'évaluation de politiques « ex ante » afin d'identifier des leviers pour l'accompagnement des changements en faveur d'une transition énergétique et alimentaire intégrée. Tout au long du projet, la méthodologie retenue cherche à co-construire en intégrant l'expertise d'acteurs du territoire à différents niveaux : entretiens lors du diagnostic servant de base conceptuelle à la modélisation, restitution des résultats en parallèle d'ateliers de discussions pour affiner le modèle et pour réaliser de l'évaluation participative de politiques publiques.

Dans les trois thèses présentées ci-dessous je suis en co-direction des travaux sur trois thèmes différents : l'environnement, l'énergie et l'urbanisme.

▼ **Nausheen JAFFUR** – ECONOMIC FEASIBILITY OF MANUFACTURING REINFORCED COMPOSITE PRODUCTS FROM LIGNOCELLULOSIC MATERIALS TO BE USED AS SUBSTITUTE FOR PLASTIC AND PAPER.

Financement : HEC⁸ – Dpt. of Chemical and Environmental Engineering, **Taux d'encadrement 30%**, 2020. Supervisor : **Dr. Pratima JEETAH – University of Mauritius.**

RÉSUMÉ – Cellulosic materials originating from plant fibres are ideal in various applications due to the different properties they offer which include low toxicity, environment-friendly, biodegradability, availability, renewability, low-cost and biocompatibility. Cellulose can be extracted through mechanical, chemical or enzymatic extraction from renewable and readily available bio resources such as coconut coir, elephant grass, bagasse, jute, hemp, flax and sisal. These plant fibres have the possibility of substituting synthetic materials in the biomedical field and polymer matrix reinforcement in order to produce composites (Mondal, 2017; Augustin et al., 2014; Fukuzumi et al. 2009). This study will deal with bioplastic production from both cellulosic and starchy material along with recycled wastepaper individually reinforced with cellulosic materials derived from agricultural residues with special focus on the concept of the resource-efficient low carbon economy through revolutionary use of agricultural residues for producing consumer products such as cups, labels, plates, packaging and writing materials. The goal is to use bio-based materials containing the highest possible proportion of materials derived from renewable biomass feedstocks while adopting less resource and energy intensive processes as well as finding more economical measures of producing composite products to substitute paper and plastic material to secure a sustainable future. The overriding aim behind this study is to investigate into the possibility of developing environment-friendly, good quality and low-cost composite materials using the maximum possible amount of renewable biomass-based derivatives (cellulosic and starchy materials) extracted from various local agricultural residues while emphasizing on energy and resource efficient processes as well as comparatively assessing the economic viability alongside the efficient processes adopted for the production of these biomass derived composite products in order to achieve optimum carbon, resource, energy and cost benefits to meet the market value. Following the production and evaluation of the products as well as a social investigation into the perception, degree of awareness and consumer attitudes among the locals in Mauritius and Reunion, the latter will eventually be proposed and commercialized to food outlets, restaurants and hotels.

▼**Hassen NABILAH – DECARBONISING ENERGY SYSTEMS OF AFRICAN SIDS FOR LONG-TERM ENERGY SCENARIOS**

Financement : HEC – Dpt. of Chemical and Environmental Engineering, **Taux d'encadrement 50%**, 2020. Supervisor : **Dr. Dinesh SURROOP – University of Mauritius.**

RÉSUMÉ – Over the past decades, the whole world has experienced the effects of climate change and global warming as a result of elevated anthropogenic carbon dioxide emissions. SIDS are contributing the least emissions of greenhouse gases and yet they are the most affected. The impacts of climate change have the ability of negatively influencing an extensive range of socio-economic aspects in SIDS – public health, sanitation, food security, economic development and employment amongst others. The Paris Agreement under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) is an international

8. The Higher Education Commission of Mauritius

treaty signed by 195 countries aiming to reduce their emissions contributing to global warming. In order not to exceed two degrees, long-term mitigation scenarios converge towards reducing the global GHG emissions to 40-70% by 2050 and emissions levels of zero or below in 2100. SIDS rely heavily on fossil fuels to meet their energy needs, especially for electricity generation and transport and therefore are extremely vulnerable to exogenous economic shocks and supply volatility. One strategy to address the economic and environmental challenges is to transition from fossil fuel to renewable energy resources. Without access to sustainable energy, the African SIDS cannot unfold development goals including economic growth, health, security and most importantly education of the future generation. Consequently, it is of prime importance to devise plans to optimise the current energy system and strategies to achieve 100% electrification rates to enable structural transformation in SIDS. The aim of this study is to investigate the pathways to optimise the electricity generation using renewable energy resources and decarbonise the energy sector in African SIDS. The specific objectives of this thesis are :

- Study the energy system of the African SIDS;
- To develop an energy optimisation model with respect to cost for the SIDS and examine potential pathways to increase the renewable energy shares;
- To devise strategies to achieve 100% electrification rate in some SIDS;
- To develop feasible scenarios to mitigate global warming;
- To investigate the energy system decarbonisation pathways to come up with relevant energy policy; options to improve the energy system in the experimental SIDS.

▼ **Lantonirina RAMANITRARIVO** – AMÉLIORATION DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT ROUTIER DE VOYAGEURS : CAS DES GARES ROUTIÈRES DE L'AGGLOMÉRATION D'ANTANANARIVO

Financement : **IST-Antananarivo** – École du Génie Civil, **Taux d'encadrement 50%**, 2017. Directeur : **Pr. Jean Lalaina RAKOTOMALALA – IST-A.**

RÉSUMÉ – La thèse consiste à étudier les infrastructures de transport routier de voyageurs particulièrement les gares routières de l'agglomération d'Antananarivo. Les enquêtes menées auprès des utilisateurs ont mis en évidence des problèmes liés à la qualité de service et à l'aménagement intérieur de ces équipements, mais surtout des problèmes d'ordre spatial et urbain. Les gares routières sont mal intégrées dans leur territoire, le transfert modal ne se fait pas toujours correctement d'où le fait que leur accessibilité soit remise en cause. La recherche vise alors à apporter des solutions pour améliorer l'organisation de ces infrastructures et satisfaire en même temps leurs usagers. Les propositions ne sont pas formulées sans connaître le fonctionnement de l'agglomération d'Antananarivo et ses visions futures en termes de structure spatiale, de développement urbain, d'occupation du sol et d'organisation des transports.

3.2.3 Encadrement Post-doctoral

En 2018, dans le cadre de la fiche action 1.16 du POE FEDER 2014-2024, nous avons obtenu un financement FEDER et Région Réunion pour le projet de recherche.

MAROONER : "Qualité de vie dans les quartiers réunionnais, lecture dialectique des représentations des habitants et gestionnaires du territoire".

Ce travail s'intéressait à la manière dont les habitants et gestionnaires du territoire réunionnais conçoivent la qualité de vie dans les quartiers et leurs représentations de la désirabilité environnementale en lien avec les modes d'habiter. En effet, au-delà des propriétés physiques, matérielles objectives, le lieu est le produit des représentations des acteurs (gestionnaires/habitants), et ce processus mental joue un rôle prépondérant dans la façon dont le lieu est vécu. Ainsi, un même espace peut-être l'objet de diverses représentations, et dans la fabrique urbaine la question de ces représentations est sensible, du fait du nombre d'acteur, ce qui peut rendre complexe la définition d'un lieu et de ses objectifs, notamment en matière de durabilité.

Nous avons ainsi croisé les discours des gestionnaires et de la population dans nos analyses afin d'évaluer en quoi ces représentations se distinguent, se rejoignent et influencent la production de l'espace réunionnais. L'objectif de travaux était de véritablement les méthodologies des sciences sociales pour appréhender la perception des usagers et des experts sur les transformations en cours sur le territoire. Pour ce faire, j'ai recruté durant deux ans le **Dr. Amandine PAYET JUNOT** qui est spécialisée en psychologie de l'environnement et qui a apporté toute son expertise méthodologie et de terrain, pour mes questionnements de recherche.

3.2.4 Projets de thèses 2021

Pour l'année prochaine trois projets sont déjà amorcés avec des acteurs du territoire. Ainsi je vais mettre en place avec deux collègues du département deux thèses en lien avec notre formation en urbanisme et une thèse dans le domaine du bâtiment.

▼ **Mahéva PAYET** – DÉCARBONISATION DU SECTEUR DU TRANSPORT EN MILIEU INSULAIRE : UNE APPROCHE PROSPECTIVE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ÉCONOMIQUES ET SOCIÉTAUX.

Financement : FEDER [Région Réunion] – Université de la Réunion, **Taux d'encadrement 50%**, 2021. Co-direction : **Pr. Michel DIMOU - LEAD Université de Toulon | Fiona Bénard – UR.**

RÉSUMÉ – La transition énergétique est aujourd'hui un enjeu sociétal majeur exigeant la mise en place de procédures technologiquement innovantes et économiquement viables. Les territoires insulaires apparaissent comme des espaces particulièrement vulnérables qui doivent relever ce défi de façon urgente. Le changement climatique, la sécurité et la fiabilité énergétiques ainsi que la volatilité des prix sont des facteurs qui contribuent à la transformation socio-technique rapide des territoires insulaires. À l'île de la Réunion, en 2018, l'indépendance électrique est de l'ordre 36,5%, mais l'indépendance énergétique plafonne à 12,8% à cause, notamment, du secteur des transports. Ce travail de thèse se focalise sur la transformation du secteur des transports en milieu insulaire. L'objectif de cette thèse est de construire différents scénarios d'évolution des transports à La Réunion afin d'identifier les trajectoires possibles de transformation énergétique du territoire. Ce travail exige un diagnostic complet des performances et des évolutions passées et futures du secteur des transports à la Réunion, en évaluant les impacts de ces changements sur la vulnérabilité économique et sociale des ménages. Cette thèse ambitionne de formuler un certain nombre de propositions concrètes permettant d'orienter les stratégies politiques régionales sur le développement des transports à la Réunion.

▼ **Recio Alfonso José BLÁZQUEZ** – VALORISATION DES MATÉRIAUX RECYCLÉS ISSUS DES DÉCHETS AGRICOLES DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION.

Financement : ANRT [CANDA CONSTRUCTION] – Université de la Réunion, **Taux d'encadrement 50%**, 2021. Co-direction : **Dr Damien Fakra.**

RÉSUMÉ – Dans un contexte insulaire isolé, la question de la gestion des déchets a pris depuis une dizaine d'années une toute autre orientation qui est celle de la valorisation. De nombreux travaux se sont focalisés sur la question de la valorisation. Ce projet de thèse s'inscrit dans le contexte propice de développement de nouveaux matériaux à partir de résidus agricoles appliqués au secteur du bâtiment. Ce travail s'appuie donc sur la logique de l'inclusion de matériaux plus respectueux environnementalement. Ainsi, une première partie du travail s'attachera à diagnostiquer les filières possibles de valorisation des déchets agricoles, mettre en œuvre des expérimentations pour la production de matériau type. Puis dans un second temps, une analyse de cycle de vie va permettre d'évaluer la qualité de ces matériaux et de leur impact sur l'économie locale. L'objectif sera ainsi de pouvoir avoir une approche globale de la qualité environnementale de ces futurs bâtiments.

▼ **Anne Lise GRONDIN** – VALORISATION DES MATÉRIAUX RECYCLÉS ISSUS DES DÉCHETS AGRICOLES DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION.

Financement : ANRT [Mairie de Saint Joseph] – Université de la Réunion, **Taux d'encadrement 30%**, 2021. Direction : **Dr Fiona Bénard**.

RÉSUMÉ – L'opposition entre le rural et l'urbain est aujourd'hui encore maintenue par les pratiques et les représentations spatiales. Dans un contexte géographique contraint comme celui de la Réunion qui a connu une urbanisation forte les séparations dichotomiques semblent vouloir s'effacer à la lumière d'un discours politique prônant la reconnaissance du caractère spécifique de la ville rurale et de ses spécificités. Ainsi, cette thèse est d'observer la question de l'attractivité de ces territoires ruraux au regard du dynamisme de la population. Par quels mécanismes peut-on aider au développement de ces territoires des Hauts et participer ainsi au rayonnement global de la commune tout en gardant le côté traditionnel et identitaire du territoire? Quelles sont toutes les formes d'attractivité de ces territoires? De l'attractivité résidentielle à l'attractivité touristique, en passant par l'attractivité économique, quels sont les leviers à activer pour trouver un équilibre entre toutes ces formes d'attractivité et l'identité territoriale? Comment mettre en place un aménagement soutenable du territoire en lien avec les besoins de construction d'espaces bâtis et de développement d'activités.

3.2.5 Synthèse encadrement de la Recherche

Le métier d'enseignant-chercheur a cela de singulier qu'il nous prépare durant nos 36 mois de doctorat à faire de la recherche. En aucun cas, nous sommes véritablement formé à enseigner à la manière des cycles de formation de l'INSPE⁹. De façon identique en tant que maître de conférences, on a rapidement l'opportunité d'encadrer une thèse. Là encore, ce travail d'encadrement n'est chose aisée, car l'on se base sur sa propre expérience (heureuse ou malheureuse!) pour tenter de dessiner les contours de ce que pourrait être un encadrement efficace et idéale. Bien que l'autonomie soit une compétence attendue d'un étudiant de ce niveau, il n'en demeure pas moins qu'il reste en formation doctorale et que l'on se doit de pouvoir guider le doctorant dans son parcours de jeune chercheur.

Cet apprentissage a été pour moi une grande expérience enrichissante, avec comme complexité majeure d'appréhender du mieux possible la réalité de chaque doctorant, afin de d'adapter mon interaction avec ce dernier. Ainsi, mes choix de directions de thèses se sont fait sur la base de deux critères :

- **Échange et ressenti général** – Ce critère me guide dans mes choix, et les directions de thèse en cours me donnent plutôt raison. Il s'agit pour moi de plutôt aller vers des étudiants que je sais pouvoir amener au point final souhaité, des étudiants qui me font confiance et en qui je peux faire confiance également. Je ne fais pas systématiquement un choix selon uniquement le niveau académique ;

9. Institut national supérieur du professorat et de l'éducation

- **Formation Régionale** – Le second point qui est tout aussi important, concerne l'Indianocéanie, j'y inclus bien évidemment la formation locale. En effet, les opportunités ne sont pas aussi nombreuses à la Réunion, ou dans la zone O.I. pour des étudiants souhaitant poursuivre en thèse. Ainsi grâce à nos formations délocalisées, mais également aux enseignements que je dispense dans d'autres formations de la zone, cela me permet de rencontrer de nouveaux candidats. Mon objectif est de contribuer significativement à une montée en compétences sur la recherche régionale et à l'accompagnement d'une relève locale et régionale.

Ainsi, mon approche de l'encadrement se fait essentiellement sur la base d'une relation interpersonnelle détendue et de confiance, dans laquelle je veux soutenir et encourager le doctorant dans son cheminement. À chaque direction de thèse, j'ai explicité l'engagement mutuel que cette aventure représentait, et des moments difficiles que nous aurions à franchir ensemble. Les thèmes que je propose font partie des axes de recherche que je souhaite développer dans les années à venir. Mon idée de former mes collaborateurs de demain, qui me permettront de forger un réseau de collaboration et d'opportunités dans la zone O.I.

Afin de pouvoir faire un point, sur mes débuts en tant qu'encadrant j'ai demandé à mes doctorants de me faire un retour sur notre collaboration et en particulier sur quels points je devrai travailler pour améliorer mon suivi. Comme j'ai pu le dire en préambule, nous ne sommes pas formé à diriger la recherche. Et c'est un peu dans une approche quasi expérimentale d'essais erreurs, que je tente aujourd'hui de définir les contours de semble être pour moi "diriger la recherche". Pour ce faire, j'ai proposé un questionnaire anonyme et un espace d'expression libre pour que mes doctorants donnent leur avis et me fassent des propositions d'amélioration de mon management de la recherche. Six des huit doctorants que je suis y ont répondu, les résultats sont présentés à la Figure 3.4. Ils reflètent les valeurs moyennes des réponses au sondage. Ainsi, la perception de mes doctorants de notre collaboration est plutôt positive. Malgré le nombre important de personnes que j'encadre ou dirige, mes doctorants semblent s'y retrouver dans le type de pilotage de la thèse que j'ai mis en place. Cela me conforte également dans les critères qui m'ont à ce jour permis de faire un choix dans le recrutement des doctorants que je dirige à l'heure actuelle.

Outre le questionnaire, un espace ouvert de propositions et d'expression a été laissé aux doctorants pour me permettre de corriger mes approches collaboratives. En synthèse du retour, un des points forts qui ressort est la qualité de l'encadrement, les échanges et la rigueur scientifique qui rassure le doctorant sur le chemin qu'il est en train d'arpenter. L'aspect humain est, à plusieurs reprises, souligné. Malgré cela, plusieurs propositions d'amélioration sont proposées :

- Éviter les reports de réunions, car relativement anxiogène pour certains doctorants ;
- Avoir plus d'échange individuel ;
- Garder de la disponibilité hebdomadaire tout au long de l'année pour des temps de discussion "officiels" ou non.

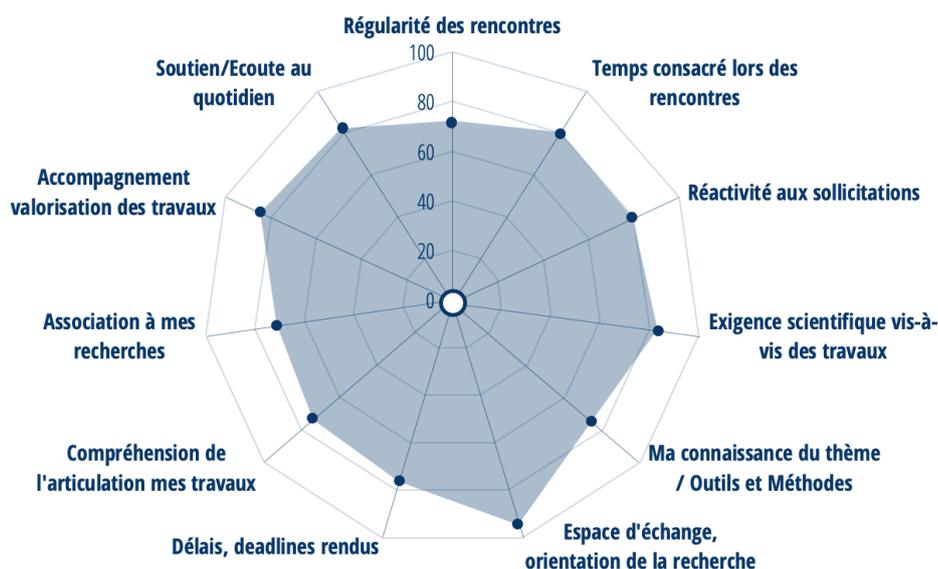


FIGURE 3.4 – Résultats du sondage auprès des doctorants et docteurs encadrés ou dirigés depuis 2015.

Au final, l'espace de propositions a mis en évidence un élément sur lequel je dois avoir une attention particulière les prochaines années au vu du volume potentiel de thèses encadrées et de nombre de thèses dans l'océan indien. En effet, la régularité des rencontres individuelles est une attente forte des doctorants, cela est relevé également dans le questionnaire. Mon souhait est de développer une forte coopération régionale à travers la co-direction de thèses dans la zone O.I., qui m'amène d'ores et déjà à réfléchir à la structuration des rendez-vous et des travaux à distance. Afin d'anticiper cela, j'ai mis en œuvre deux projets PHC et un ERASMUS+ actuellement qui vont accompagner des mobilités courtes ou longues durée de mes doctorants étrangers sur l'année 2020 et 2021.

Ma méthode d'encadrement doctoral repose à l'heure, sur plusieurs points qu'il me semble indispensable de mettre en place afin de réussir en toute sérénité des travaux de recherche en commun :

- Manager la relation Directeur - doctorant, en apprenant de ce dernier, afin de comprendre comment aborder les enjeux, les problèmes etc. auxquels nous aurons à faire face durant la thèse ;
- Fournir les outils et méthodes adaptés au démarrage de la thèse afin d'organiser le développement de ses compétences et la montée en autonomie ;
- Structurer et organiser les 3 années de thèse afin d'avoir une vision claire des enjeux de la thèse à chaque étape et responsabiliser le doctorant ;
- Encourager et accompagner le doctorant dans la valorisation de ces travaux.
- Diversifier le champ de compétences du doctorant en le faisant participer à d'autres projets de recherche ou en l'incluant dans nos champs de formation.

Structuration de laboratoires & École doctorale – Je suis depuis cette année 2020, également dans l'équipe scientifique qui accompagne deux structures de la Zone OI à savoir l'Université des Comores et les ISTs de Madagascar dans leur mise en œuvre de laboratoires et école doctorale. En effet, les trois ISTs de Madagascar ont fait le choix depuis plusieurs années de s'orienter vers une structuration en laboratoires de recherche. Mon intervention au sein de cette transition est depuis deux dans l'appui à la formation des doctorants et jeunes chercheurs à la Recherche. Puis de façon plus précise, mon implication a porté auprès du DG de l'IST d'Antananarivo sur la définition des axes stratégiques à porter dans les prochaines et du pilotage scientifique à définir afin de mettre en place ces structures. Concernant les Comores, ma participation est pour l'heure encore à ces débuts, car je participe principalement à l'appui scientifique de doctorants et d'une thèse que je devrais codiriger en 2021. En ce sens, ma jeune expérience de direction de thèse s'avère être une aubaine pour un partage des approches du management de la Recherche en particulier dans le cadre de travaux de thèses.

3.3 Production scientifique

3.3.1 Introduction générale

Cette section présente ma production scientifique depuis mon recrutement en 2010. J'ai d'abord synthétisé dans les tableaux 3.1 et 3.2 ci dessous les grandes lignes des articles ou des présentations orales ainsi que les journaux dans lesquels ont été publiés mes travaux.

TABLE 3.1 – Synthèse des publications et communications

Publications / Communications	Nombre
Articles dans des revues internationales avec comité de lecture	17
Chapitres d'ouvrages	3
Conférences Internationales avec comité de lecture et actes	16
Conférences Nationales avec comité de lecture avec actes	9
Conférences Nationales sans actes	2
Conférences invités	3
Rapports de projet	5
Articles dans des revues internationales avec comité de lecture en évaluation	5

TABLE 3.2 – Référencement des revues dans lesquelles les articles ont été publiés.

Revues	Impact factor	Impact factor à 5 ans	SJR	
Renewable and Sustainable Energy Reviews	12.110	12.348	3.632	Q1
Applied energy	8.848	9.086	3.607	Q1
Energy and buildings	4.867	5.055	2.06	Q1
Journal of Cleaner Production	7.246	7.491	1.886	Q1
Building and Environment	4.971	5.459	1.87	Q1
Applied Thermal Engineering	4.725	4.514	1.780	Q1
Revue général de froid	3.461	3.655	1.543	Q1
Sustainability	2.576	2.798	0.581	Q2
Utilities Policy	1.835	2.358	0.89	Q1
Energy Procedia			0.55	
AIMS energy	0.93		0.28	Q1
JP Journal of Heat and Mass Transfer	2.19	4.25	0.15	Q4
International Journal of Engineering Researches and Management Studies	3.775	2.785		

3.3.2 Revues internationales en évaluation

- ART.[1] **Jean Philippe Praene**, Rindrasoa Miangaly Rasamoelina, Leslie Ayagapin, Addressing Madagascar electricity consumption : Scenarios based on a method combined sensitivity analysis with LMDI – **Renewable and Sustainable Energy Reviews**.
- ART.[2] Amandine Junot, **Jean Philippe Praene**. Thinking to liveability as a condition to sustainability : an overview and application for urban management – **Environmental Impact Assessment Review**.
- ART.[3] **Jean Philippe Praene**, Fiona Benard, Leslie Ayagapin, Mohamed Nasroudine Mohamed Rachadi, The energy landscape of the Comoros :Furthering renewables for sustainable islands – **Renewable Energy**. *En révision*.
- ART.[4] Fiona Benard, **Jean Philippe Praene**, Dinesh Surroop, Marching towards sustainable territories : The case of small islands – **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**.
- ART.[5] Amandine Junot, **Jean Philippe Praene**. Quelles représentations du quartier idéal à La Réunion ? Une réflexion sur les modes d'habiter et la qualité de vie comme indicateurs de la durabilité urbaine – **Développement durable et territoires**. *En révision*.

3.3.3 Revues internationales avec comité de lecture

- ART.[1] Leslie Ayagapin, **Jean Philippe Praene**, Environmental overcost of single family houses in insular context : A comparative LCA study of Reunion island and France – **Sustainability Journal**.
- ART.[2] **Jean Philippe Praene**, Bruno Malet-Damour, Mamy Harimisa Radanielina, Ludovic Fontaine, Garry Rivière (2019). GIS-based approach to identify climatic zoning : A hierarchical clustering on principal component analysis. Volume 164, Août 2019. **Building and Environment**.
- ART.[3] Sora, F., **Praene, J.P.** (2018). Sustainable urban planning for a successful energy transition on Reunion Island : From policy intentions to practical achievement. Volume 55, December 2018, Pages 1-13 **Utilities Policy Journal**.
- ART.[4] **Praene, J.P.**, Payet, M., Sora, F. (2018). Paths of sustainable transition in small island developing states. Volume 54, October 2018, Pages 86-91 **Utilities Policy Journal**.
- ART.[5] F. Bénard-Sora, **J.P. Praene**, Y. Calixte (2018). Assess the local electricity consumption : the case of Reunion island through a GIS based method. **AIMS Energy**,6(3) : 436-452., doi : 10.3934/energy.2018.3.436.
- ART.[6] **Jean Philippe Praene**, Mamy Harimisa Radanielina, Vanessa Rolande Rakotoson, Ando Ludovic Andriamamonjy, Frantz Sinama, Dominique Morau, Hery Tiana Rakotondramiarana, Electricity generation from renewables in Madagascar : Opportunities and projections, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 76, 2017, Pages 1066-1079, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.125>.
- ART.[7] **Praene, J.P.**, & Rakotoson, V. (2017). Environmental sustainability of electricity generation under insular context : An LCA-based scenario for Madagascar and Reunion

- island by 2050. **International Journal of Engineering Researches and Management Studies**, 2(4), 24-42.
- ART.[8] Bénard-Sora, F., **Praene, J. P.** (2016). Territorial analysis of energy consumption of a small remote island : Proposal for classification and highlighting consumption profiles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 59, 636-648.
- ART.[9] **Praene, J. P.**, Radanielina, M. H., & Rakotondramiarana, H. T. (2016). Dish stirling system potential assessment for eight main sites in Madagascar. **JP Journal of Heat and Mass Transfer**, 13(1), 119.
- ART.[10] Marc, O., Sinama, F., **Praene, J. P.**, Lucas, F., & Castaing-Lasvignottes, J. (2015). Dynamic modeling and experimental validation elements of a 30 kW LiBr/H₂O single effect absorption chiller for solar application. **Applied Thermal Engineering**, 90, 980-993.
- ART.[11] **Praene, J. P.**, Marc, O., Andriamamonjy, A. L., & Razakaniaina, F. L. (2015). Retour d'expérience sur une installation de froid solaire : expérimentation et modélisation. **Revue Générale du Froid & du conditionnement d'air**, 103, 1149.
- ART.[12] Hamza Semmari, Olivier Marc, **Jean-Philippe Praene**, Amandine Le Denn, François Boudéhenn, Franck Lucas, Sensitivity Analysis of the New Sizing Tool "PISTACHE" for Solar Heating, Cooling and Domestic Hot Water Systems, **Energy Procedia**, Volume 48, 2014, Pages 997-1006, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.114>.
- ART.[13] **Praene, J. P.**, David, M., Sinama, F., Morau, D., & Marc, O. (2012). Renewable energy : Progressing towards a net zero energy island, the case of Reunion Island. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16(1), 426-442.
- ART.[14] Miranville, F., Fakra, A. H., Guichard, S., Boyer, H., **Praene, J. P.**, & Bigot, D. (2012). Evaluation of the thermal resistance of a roof-mounted multi-reflective radiant barrier for tropical and humid conditions : Experimental study from field measurements. **Energy and Buildings**, 48, 79-90.
- ART.[15] **Praene, J. P.**, Bastide, A., Garde, F., & Lucas, F. (2011). Modelling of an evacuated tube collector sensitivity analysis approach. **JP Journal of Heat and Mass Transfer**.
- ART.[16] **Praene, J. P.**, Marc, O., Lucas, F., & Miranville, F. (2011). Simulation and experimental investigation of solar absorption cooling system in Reunion Island. **Applied Energy**, 88(3), 831-839.
- ART.[17] Marc, O., **Praene, J. P.**, Bastide, A., & Lucas, F. (2011). Modeling and experimental validation of the solar loop for absorption solar cooling system using double-glazed collectors. **Applied Thermal Engineering**, 31(2), 268-277.

3.3.4 Chapitre d'ouvrages

- CHAP.[1] **Praene, J. P.** (2010). Solar absorption cooling system in tropical climate : Design and experiment, **Cooling India**.
- CHAP.[2] Gusev, A. L., Saint-Gregoire, P., ... **Praene, J. P.** (2008). Simulation of a solar absorption system. **Special issue of the International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology**.

- CHAP.[3] Gusev, A. L., Saint-Gregoire, P., ... D. Morau, **Praene, J. P.** (2008). Modelling and elements of validation of solar drying : application to activated sludge drying of waste water. **Special issue of the International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology.**

3.3.5 Conférences Internationales avec comité de lecture

- ACTI.[1] **Praene, J. P.**, Benard, F. 2019. Pathways for sustainable transition for European countries : A statistical analysis, **12th International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection**, Sharjah - United Arab Emirates.
- ACTI.[2] Ayagapin, L., **Praene, J. P.**, Benard, F. 2019. Effect of the electricity mix on the construction sector impact : an LCA approach, **12th International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection**, Sharjah - United Arab Emirates.
- ACTI.[3] Eve Etienne, **Praene, J. P.**, Divya Leducq Jean-Claude Gatina. 2019. " A text mining approach to investigate urban planning documents : study case of Reunion Island." In **59th ERSA Congress "Cities, Regions and Digital Transformations : Opportunities, Risks and Challenges"**. Lyon, France.
- ACTI.[4] Ayagapin, L., **Praene, J. P.**, Rakotoson, V. 2019. Environmental impact of the construction sector on life cycle : evidence of the insularity effect, **3rd International Conference on Energy, Environment and Climate Change**, Mauritius.
- ACTI.[5] **Praene, J. P.**, Benard, F. 2019. The ongoing energy transition : A comparative analysis of SIDS and European ultraperipheral islands, **3rd International Conference on Energy, Environment and Climate Change**, Mauritius.
- ACTI.[6] **Praene, J.P.**, Rasamoelina, M. Rakotoson, V., 2019. Energy-related carbon emission from electricity sector : past trends and futures for Madagascar, **14th SDEWES Conference**
- ACTI.[7] Eve Etienne, Divya Leducq, **Jean Philippe Praene**, Jean-Claude Gatina, and Fiona Sora. 2017. "Vers Une Approche Multidimensionnelle de La Durabilité : Évaluation d'un Projet d'aménagement Durable." In **Spatial Analysis and GEomatics** 2017. Rouen, France : INSA de rouen. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01643372>.
- ACTI.[8] Rakotoson, V., **Praene, J.P.**, 2017. Long-term electricity mix planning towards low GHG emission : The case of Reunion Island, **12th SDEWES Conference**.
- ACTI.[9] Kelvin Pavadépoullé, Fiona Sora, **Jean-Philippe Praene**, Jean-Claude Gatina. Effets des projets d'aménagement sur le voisinage directe à l'échelle des aires urbaines. Analyse spatiale diachronique en milieu insulaire. **SAGEO Spatial Analysis and GEomatics** 2017, Rouen, France.
- ACTI.[10] Sora, F., **Praene, J.P.**, 2017. Les Petits Etats Insulaires en Développement face au défi de la transition énergétique : entre forces et faiblesses, étude de leur vulnérabilité. **54^e Colloque de l'ASRDLF** : "Cities and regions in a changing Europe : challenges and prospects", 5th-7th July, Athens, Greece.

- ACTL.[11] Marc, O., Guillou, P., Sinama, F., Lucas, F., **Praene, J.P.**, Castaing-Lasvignottes, J. (2015). Modeling of a thermal storage system incorporated into a solar cooling installation in an office building, **The 28th ECOS2015 (FRANCE)**
- ACTL.[12] Letexier, B., Marc, O.,**Praene, J.P.**, Lucas, F. (2012, February). Sensitivity analysis of a solar cooling system. In **ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis** (pp. 279-288). American Society of Mechanical Engineers.
- ACTL.[13] **Praene, J. P.**, Mara, T. A., & Lucas, F. (2010, September). Optimization of the heat production of a solar cooling plant : Sensitivity Analysis. **World Renewable Energy Congress XI**.
- ACTL.[14] **Praene, J. P.**, Bastide, A., Lucas, F., Garde, F., & Boyer, H. (2007, June). Simulation And Optimization of a Solar Absorption Cooling System Using Evacuated Tube Collectors. **9th REHVA World Congress' WellBeing Indoors', CLIMA 2007**.
- ACTL.[15] **Praene, J. P.**, Garde, F., & Lucas, F. (2005, August). Dynamic modelling and elements of validation of solar evacuated tube collectors. **Ninth international IBPSA conference**.
- ACTL.[16] **Praene, J. P.**, Garde, F., & Lucas, F. (2005, January). Steady state model of a solar evacuated tube collector based on sensitivity analysis. **ASME, International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, Orlando, Florida, USA.

3.3.6 Conférences Nationales avec actes

- ACTN.[1] Sora, F.,**Praene, J.P.**, Serra, L., 2017. La transition énergétique à l'épreuve des territoires : l'île de La Réunion entre ambitions politiques et réalisations concrètes , **Colloque - Transition énergétique et résilience des territoires – Planifier, construire, expérimenter**, Saint Briec - France.
- ACTN.[2] **Praene J.P.** ,Radanielina M.H. ,Rakotoson V. , Sora F.,(2017). L'impératif de transition énergétique des territoires : Une lecture multi-scalaire. **Journées de Recherche - 2ème édition, IST Antananarivo, Madagascar**.
- ACTN.[3] Radanielina, M. H., **Praene, J.P.**, Morau, D., Rakotomala, M. S., Tsiriry, R., & Rakotondramiarana, H. T. (2016, December). Modélisation hydrodynamique du processus de gazéification de la biomasse par une approche Euler-Lagrange. **3ème Congrès International Plasma Energie, CIPE2016**.
- ACTN.[4] N Ranarivelo, M Rajaonahy, HT Rakotondramiarana, **JP Praene**, Analyse exergetique de l'île de la Réunion.**3ème Congrès International Plasma Energie, CIPE2016**.
- ACTN.[5] Rakotoson, V., Adélar, L., **Praene, J.P.** (2016). Évaluation des émissions de gaz à effet de serre du mix électrique de territoires insulaires. In **Conférence IBPSA**, France-Marne-la-Vallée.
- ACTN.[6] Nidhoimi, E.A, Gatina, J. C.,**Praene, J.P.**, & Fakra, A. H. (2014, December). Approche dynamique du fonctionnement énergétique d'un espace bâti et bilan carbone associé : Application sur un gîte rural situé à Mayotte, **CIPE2014**.

- ACTN.[7] Marc, O., **Praene, J. P.**, Letexier, B., Castaing-Lasvignottes, J., Sinama, F., Lucas, F. (2012). Optimisation des performances d'une machine à absorption utilisée dans une installation de rafraîchissement solaire et fonctionnant à charge partielle. **IBPSA**, Chambéry, 6-8.
- ACTN.[8] **Praene, J. P.**,(2012). Solar energy for a brighter future : Le rafraîchissement solaire. **Conférence Innovation solaire**, TEMERGIE.
- ACTN.[9] Marc, O., **Praene, J. P.**, Letexier, B., Castaing-Lasvignottes, J., Sinama, F., & Lucas, F. (2012, May). Modélisation dynamique, simulation et éléments de validation expérimentale d'une machine à absorption, utilisée dans une installation de rafraîchissement solaire. **SFT**).

3.3.7 Conférences invitées

- CNI.[1] **Praene, J.P.** – (2019), Des énergies fossiles aux énergies renouvelables : tour d'horizon scénarios de long terme à Madagascar, **Forum régional des énergies durables**.
- CNI.[2] **Praene, J.P.**, Benard, F.(2017), L'impératif de transition énergétique des territoires : Une lecture multi-scalaire, **Journées de Recherche de l'IST d'Antananarivo**.
- CNI.[3] **Praene, J. P.**, Towards a net zero energy island,**CIPE2012**, Madagascar.

3.3.8 Symposiums

- SY.[1] **Praene, J. P.**,(2017). Vulnérabilité énergétiques dans une société post-coloniale. **3ème journée d'études du réseau Humanités Environnementales à La Réunion, Le Tampon, Réunion**.
- SY.[2] Benard, F.,**Praene, J. P.**,(2017). Mesurer la vulnérabilité énergétique d'un territoire. **1e Colloque de la Transition Énergétique à l'Épreuve des Territoires, Le Tampon, Réunion**.

3.3.9 Rapports de projet

- RPT.[1] Benard, F. **Praene, J. P.**,(2019). LOTOLA, Analyse du potentiel des stations de recharges pour véhicules électriques - Rapport final.
- RPT.[2] **Praene, J. P.**, Benard, F. (2018). TRANSEETER, Transition énergétique à l'épreuve des territoires - Rapport final et restitution en commission.
- RPT.[3] **Praene, J. P.**,(2013). Optimisation des installations de froid solaire par analyse de sensibilité. **Rapport projet ANR MEGAPICS**.
- RPT.[4] F. Lucas, O. Marc,**J.P. Praene ANR ORASOL** : Optimisation de procédés de rafraîchissement solaire (2010).
- RPT.[5] F. Lucas, **J.P. Praene**, O. Marc, **Projet ADEME RAFSOL** : Rafraîchissement solaire par absorption (2008)

Deuxième partie

Synthèse des activités de recherche

Préambule

CETTE partie propose une vue d'ensemble de mes principaux axes de recherche que j'ai développée au sein du laboratoire depuis 10 ans. J'ai ainsi retracé de façon quasi chronologique les étapes qui m'ont menée jusqu'à mes travaux actuels.

Cette déclinaison est particulièrement intéressante, car elle permet de mettre en lumière l'évolution de mon parcours. Je me suis en effet intéressé dans un premier temps à la question de la transition énergétique à travers les systèmes de production renouvelable. Cette approche permet de répondre à une demande toutefois, il ne m'était pas possible d'avoir une vue d'ensemble des enjeux du territoire. C'est donc pour cette raison que nous nous sommes intéressés aux sciences des données pour nous permettre un changement d'échelle d'analyse et de migrer à l'échelle d'un territoire.

Ces nouvelles approches ont permis d'alimenter nos analyses sur les questions d'aménagement durable, de construction des indicateurs permettant d'évaluer le degré de vulnérabilité des territoires. Cela nous a également permis de mettre en place de nouveaux travaux nécessitant des données fiables à savoir la prospective énergétique et l'analyse de cycle de vie.

Cette partie va donc dresser ce cheminement de 10 ans au sein du laboratoire PIMENT, avant proposer une ouverture sur de récents projets de recherche que sont initiés actuellement ou en cours de dépôt.

Contexte général

Sommaire

4.1 Introduction	55
4.2 Travaux de thèse	57
4.2.1 La production de froid solaire	59
4.2.2 Modélisation et expérimentation	60
4.2.3 Conclusion	69
4.3 Problématique et positionnement de ma recherche	71

CETTE section de mon mémoire d'HDR présente la logique de mon parcours de chercheur au sein du laboratoire. Cet éclairage est d'autant plus important qu'en dix ans, j'ai réorienté ma thématique de recherche et que dans le même temps le laboratoire s'est structuré autour de nouvelles thématiques tel que l'énergie, l'urbanisme et l'environnement. Il m'a donc semblé judicieux de poser clairement ce contexte qui éclaire mes choix en matière de développement de la recherche depuis plus cinq ans.

4.1 Introduction

La nécessité d'une transition énergétique et écologique vers une société bas carbone, moins énergivore, vers des modèles économiques plus soutenables est aujourd'hui sans équivoque. Ces questions traversent les disciplines et leur font se côtoyer pour relever ce défi de la transition. L'exigence de questionnements, d'expérimentations, mais surtout d'actions est d'autant plus un impératif que les territoires à l'instar des PEID¹ ou des ZNI² sont particulièrement vulnérables,[Briguglio 1995]. Ces vulnérabilités peuvent prendre différentes formes i.e. : géographique (isolement, taille des îles, biodiversité...), historique (poids d'une empreinte postcoloniale) et socio-économiques (fragilité de l'emploi, taille des marchés...), [Garabedian 2011]. On trouve ainsi dans l'histoire de la Réunion, un certain nombre de pratique importées de la France hexagonale, qui ne sont pas totalement pertinentes et adaptées au contexte local.

1. Petits États Insulaires en Développement
2. Zones Non Interconnectées

C'est donc dans cette logique que c'est développé le laboratoire PIMENT depuis 28 ans. Répondre à des enjeux en climat sub-tropical, en mettant en œuvre des outils et méthodes reproductibles à d'autres territoires insulaires, tel a été la politique de développement du laboratoire. En amont de la création du laboratoire des travaux se sont intéressés aux questions de l'énergétique à la Réunion sous différents aspects : gisement solaire, énergétique dans l'industrie sucrière, thermique du bâtiment, [Boyer 1999b].

En 1992, le Laboratoire de Génie Industriel (LGI) a été formé sous la direction du Pr Jean Claude Gatina. En amont de ce laboratoire un premier la laboratoire avait été créé en 1982 sous le nom de Laboratoire d'Énergétique Solaire. Les grands axes de ce laboratoire concernaient le rayonnement solaire, l'habitat bioclimatique et certains systèmes solaires. Le premier rapport du laboratoire dans le cadre d'un programme quinquennal de maîtrise de l'énergie portait une grande étude du potentiel énergétique local [Baronnet 1983]. Lors de ma thèse, j'étais rattaché à l'équipe Génie Civil et Thermique de l'Habitat (GCTh). L'activité historique de cette équipe d'accueil était structurée autour de la modélisation thermo-aéraulique des bâtiments et des systèmes qui y sont associés (climatisation, systèmes de traitement d'air...). Ma thèse, portant sur le froid solaire, est arrivée au sein de l'équipe dans la logique des perspectives posées par le responsable de l'équipe Pr Harry Boyer : une meilleure appréhension des interactions et enjeux liés à l'énergie et l'environnement.

Ma thèse a été la première à la Réunion à traiter des énergies renouvelables. Ainsi le laboratoire, dans les années 2000, a opéré une adjonction à l'axe historique de thermique du bâtiment. La logique d'approche de modélisation des systèmes et de l'expérimentation a été conservée. Toutefois nous nous sommes ouverts aux systèmes énergétiques renouvelables en y développant en particulier des travaux dans les domaines du solaire [Praene 2007, Marc 2010], de la valorisation des déchets [Morau 2006] ou encore de l'énergie thermique des mers [Sinama 2011]. Cette part grandissante des systèmes énergétiques renouvelables dans l'activité de recherche a fait évoluer le LGI-GCTh vers le Laboratoire de Physique du Bâtiment et des Systèmes (LPBS). Cette nouvelle structuration s'articulait autour de trois axes :

- PhyBat | Physique du Bâtiment ;
- OMAB | Outils mathématiques appliqués au Bâtiment ;
- SEERAB | Systèmes Energétiques et Energies Renouvelables Appliquées au Bâtiment.

Cette organisation donnait ainsi sens aux opportunités que représentaient l'expérimentation et la modélisation dans des énergies renouvelables avec comme point focal, son application de près ou de loin au bâtiment. Enfin, plus récemment, la fusion de l'équipe AIM³ et du LPBS a abouti à la création <https://nmac.to/ion> du laboratoire PIMENT⁴ qui compte aujourd'hui 32 personnels permanents. Cette nouvelle équipe d'accueil a maintenu une organisation en trois axes : Energie, Efficacité énergétique des espaces bâtis et Ingénierie mathématique. Ces évolutions du laboratoire montrent bien la volonté tout au long de notre histoire de

3. Analyse et Ingénierie Mathématique

4. Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'Environnement et le Bâtiment

nous ouvrir vers de nouveaux champs en interaction avec nos compétences et domaines historiques. Lors de notre dernière évaluation Hcéres, [Hcéres 2019], il a ainsi été relevé que le domaine majeur de recherche du laboratoire est celui de l'énergie, et que ces travaux trouvent encore plus de sens compte tenu des conditions climatique et géographiques auxquels elles s'appliquent.

Les différentes "mutations" choisies par les membres du laboratoire ont permis d'animer des nouvelles dynamiques de recherche et de saisir les opportunités d'interaction avec le tissu économique local et les laboratoires de la zone O.I. Notre histoire nous montre bien la nécessité de la prospective s'appuyant sur son ADN pour mûrir de nouveaux thèmes de recherche avec nos axes stratégiques. Le laboratoire jouit ainsi d'un rayonnement local remarquable dans les domaines de la construction en milieu tropical, de l'énergie et de l'environnement. Clairement orienté sur les approches systémiques, la modélisation des systèmes complexes (bâtiments, production d'énergie, stockage) et les outils mathématiques associés, [Mara 2017, Mamode 2017], depuis plusieurs années, nous avons étendu nos travaux à d'autres échelles d'analyse que sont les quartiers, les villes ou le territoire dans son ensemble. Les travaux ont porté à la fois sur des diagnostics du territoire, [Bénard-Sora 2016], ou l'étude de gisement ou potentiel énergétique [David 2018, Praene 2017a].

C'est donc dans cette logique de nouvelles échelles que j'ai développé mes travaux durant ces dix dernières années, depuis mon doctorat. Je présenterai plus en détails mon positionnement de recherche à la fin de ce chapitre. Ces échelles d'analyse concerne différents champs dans lesquels je m'investis. La Figure 4.1 résume les axes majeurs où je m'investis ces dernières années.

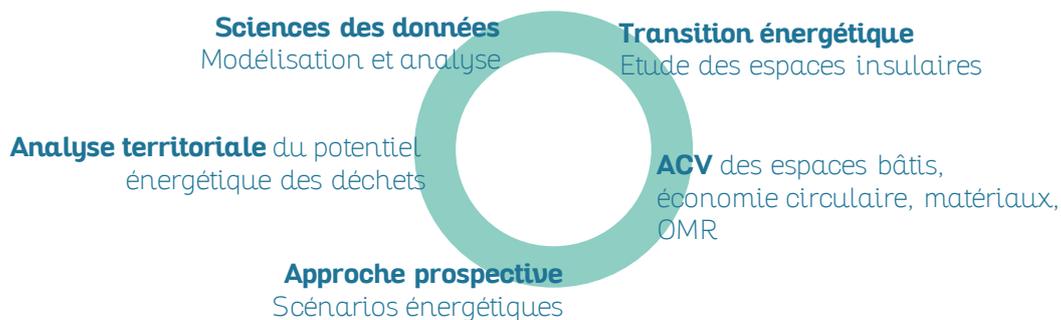


FIGURE 4.1 – Thèmes de recherche portés ces cinq dernières années.

4.2 Travaux de thèse

Mes travaux de thèse marque le démarrage de l'axe énergie renouvelable en 2003 au sein du laboratoire impulsé par le Dr Franck Lucas, qui était également mon co-encadrant de

thèse. Ma thèse était co-financée par l'ADEME et la Région Réunion. Mes travaux s'inscrivaient dans un contexte politique local volontariste de promotion des énergies renouvelables qui permettrait à la Réunion de se singulariser en amorçant rapidement un virage vers l'autonomie énergétique. Pour autant les circonstances n'étaient pas nouvelles. Dès les années 90, le PCR⁵ par la voix de Paul Vergès alertait déjà les effets du changement climatique auxquels nous devrions faire face. Le modèle d'une évolution vers l'autonomie énergétique, malgré un accueil mitigé, avait été présenté à l'UNESCO en 1999. Ainsi Paul Vergès parvient à inscrire les enjeux du dérèglement climatique comme une priorité nationale, par la création de l'ONERC⁶ en 2001. Par conséquent ces espaces insulaires n'étaient plus vue uniquement au prisme de leur vulnérabilité mais comme de véritables laboratoires d'observation du changement climatique et d'expérimentation de stratégies d'adaptation à ces effets. En cohérence avec les enjeux territoriaux, notre laboratoire développe deux thématiques complémentaires dans cette problématique de la transition énergétique :

- Maîtrise de l'énergie | **Où comment contenir l'intensité énergétique du territoire**
– à travers des conceptions de bâtiments plus adaptés au climat, un report modal et un changement des usages en termes de déplacements ;
- Décarbonisation du mix énergétique | **Effacer l'importation d'énergies fossiles**
pour la production d'électricité et pour le transport (à moyen terme).

Mon travail de thèse dont je vous propose à présent une synthèse aspirait à répondre aux enjeux du second axe sur un secteur particulier celui du bâtiment. Malgré des travaux orientés sur la conception bioclimatique de bâtiments tertiaires ou résidentiels, [Garde 2011, Garde 2006], en milieu tropical, certains bâtiments, de part leur localisation géographique doivent toujours recourir à des dispositifs actifs pour climatiser leurs locaux. L'utilisation de la climatisation ou d'une ventilation électrique pour rafraîchir les bâtiments représente déjà environ un cinquième de l'électricité totale mondiale, soit 10% de la consommation mondiale d'électricité actuelle, [IEA 2018]. De plus, à mesure que les revenus et le niveau de vie s'améliorent dans de nombreux pays en développement, en particulier l'Inde, la croissance de la demande de climatisation dans les régions les plus chaudes devrait s'envoler. Le contexte énergétique mettait en exergue une forte dépendance aux ressources fossiles pour la production d'électricité. Comme le présente la Figure 4.2, la part d'ENRs ne dépassait pas les 36% et ce malgré la volonté politique de décarbonisation du mix. Les huiles usagées ne sont pas comptabilisées séparément car brûlées avec le charbon dans la production d'électricité. L'usage de plus en plus répandue de dispositif individuel de climatisation entraîne ainsi une double conséquence. D'une part, un pic de demande d'électricité durant l'été et, d'autre part, compte tenu du mix un impact environnemental non négligeable en particulier concernant les émissions de gaz à effet de serre.

Les émissions de CO₂ s'élèvent à 1 888 479 tonnes dues pour 86,3% à la combustion du charbon. Ainsi le ratio moyen est de 815 gCO₂/kWh, ce qui est très élevé. La consommation d'électricité à la Réunion représente 23,6% des émissions par habitant soit 4,74 t/hab. A titre de comparaison, ce chiffre nous plaçait légèrement au dessus de la Chine avec 3,64 t/hab

5. Partie Communiste Réunionnais

6. Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique

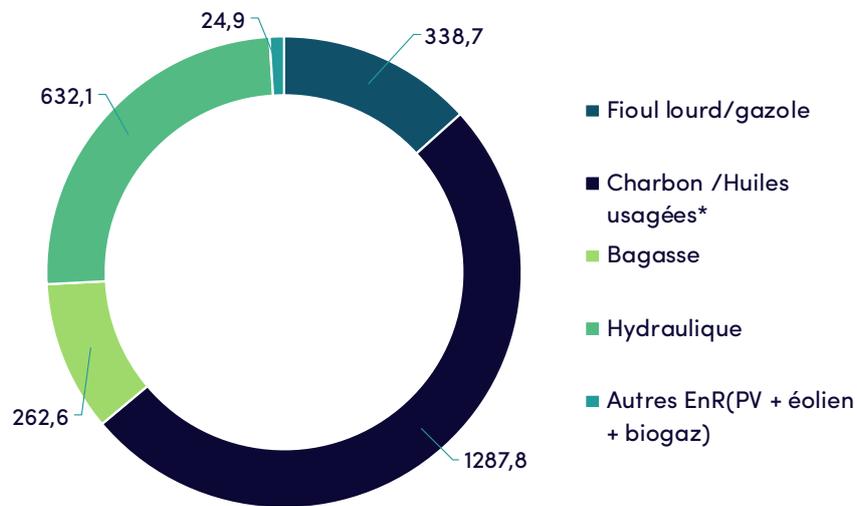


FIGURE 4.2 – Mix de la production électrique de la Réunion en 2008.

[IEA 2008]. Ce contexte favorise la recherche d’alternative de consommation énergétique plus sobre. Par conséquent, l’objectif est de trouver d’autres solutions actives pour le rafraîchissement des bâtiments sur la zone littorale (< 400m d’altitude); zone qui concentre à ce jour près de 80% de la population du territoire.

L’objectif était donc d’étudier la mise en œuvre d’une installation de froid solaire dans le cadre du rafraîchissement de locaux. Dans les parties suivantes, nous verrons les outils et modèles mobilisés pour la modélisation des composants et les résultats obtenus dans le cadre des travaux.

4.2.1 La production de froid solaire

L’avantage majeur concernant les dispositifs de froid solaire est qu’il y a une parfaite coïncidence entre le besoin de rafraîchissement et la disponibilité de la ressource solaire [Henning 2007a]. Cette adéquation s’observe aussi bien à l’échelle de la journée qu’à l’échelle de la saisonnalité. D’un point de vue historique, la première démonstration d’une machine à absorption fonctionnant à l’énergie solaire date de 1878. En effet, lors de l’exposition universelle de Paris, Augustin Mouchot proposa un démonstrateur en se basant sur les travaux d’Edmond Carré.

Avant d’exposer les technologies de production, nous allons d’abord expliciter cette notion de rafraîchissement. En effet, dans le domaine du froid, la notion de climatisation ramène systématiquement à celle de consigne stricte de fonctionnement. En climatisation, une température opérative est fixée comme objectif et le système se doit de répondre à la demande. Dans le cas d’un rafraîchissement, le raisonnement ne se fait pas selon une contrainte stricte, mais une certaine flexibilité sur l’objectif est admise. Ainsi, la question s’appréhende par le

biais du confort. On peut ainsi définir une plage tolérable de température dans laquelle on peut se situer et pour laquelle on sait que l'on est toujours en situation de confort, au sens des indices de confort classique comme défini dans la littérature [Garde 1998, Bojic 2013]. À titre d'exemple, les recommandations de consigne de mise en fonctionnement d'une climatisation s'applique pour une température supérieure à 26°C dans les locaux.

D'un point de vue thermodynamique, il existe de nombreux processus concevables qui permettent la conversion du rayonnement solaire en froid. La conversion peut se faire selon deux principes solaire électrique (photovoltaïque) ou thermique (cycles thermodynamiques) [Henning 2007b]. La première option repose sur une machine frigorifique à compression vapeur classique dont la source électrique est simplement solaire. Notre choix, dans le cadre de ma thèse, a été de nous orienter plutôt vers les cycles fermés en particulier les machines à absorption simple effet, couplés à des capteurs solaires thermiques. Ma thèse est intervenue dans un contexte où le principe de froid solaire était bien établi, mais le retour d'expérience sur des installations était peu étudiés. Ainsi, l'Agence internationale de l'énergie a défini à travers sa tâche 32 des objectifs clairs afin d'améliorer les conditions du déploiement sur le marché des systèmes de froid pour les bâtiments commerciaux et résidentiels :

- Améliorer les composants des systèmes ;
- Définir des systèmes pré-élaborés pour des locaux commerciaux ;
- Créer des outils simples de dimensionnement sur-mesure pour des grands bâtiments non-résidentiels ;
- Développer des applications industrielles ;
- Développer des modèles et des outils d'analyse.

Mes travaux intervenaient en amont de la mise en place du pilote expérimental RAFSOL⁷, en 2008 à l'IUT de la Réunion. L'objectif était de modéliser la future installation en fonction des besoins identifiés du département Génie Civil de l'IUT.

Les premiers pas du rafraîchissement solaire en France date de 1992 avec le cas des caves viticoles de Banyuls. Il s'agissait d'une installation de 52 kW dont l'énergie au générateur était fournie par 132 m² de capteurs solaires sous vide et un ballon de stockage chaud de 1000 L [Mugnier 2002]. Le COP⁸ est le rapport entre la production de froid et la chaleur utilisée au niveau de la source chaude, hors consommation électrique des auxiliaires (pompes, ventilateurs). Comme on peut le voir à la Figure 4.3, le COP augmente avec la température de la source chaude. Ainsi, le choix du système à étudier se fait selon les conditions de température au générateur, et par conséquent en fonction des technologies de capteurs solaires thermiques choisis.

4.2.2 Modélisation et expérimentation

Le principe général d'une installation de production de froid solaire par absorption est proche des systèmes de compression à vapeur classique. La compression mécanique est ainsi remplacée par une compression thermique constituée du couple absorbeur-desorbeur. Dans

7. RAFraichissement SOLaire

8. Coefficient de performance

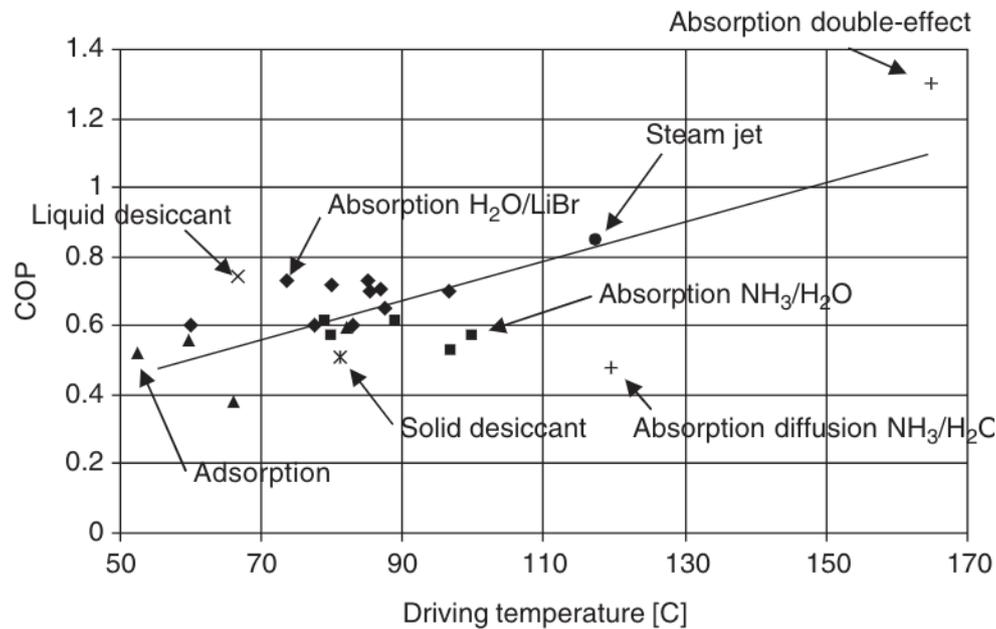


FIGURE 4.3 – COP et température opérative des différents dispositifs à sorption [Balaras 2007].

le cadre des applications de froid solaire, deux couples sont le plus souvent utilisés pour l'absorption liquide :

- Eau-LiBr, où l'eau est le fluide frigorigène et le sel LiBr est l'absorbant ;
- Ammoniac-Eau, où l'ammoniac est cette fois-ci le fluide frigorigène.

Plusieurs paramètres peuvent être considérés pour permettre une classification des machines à absorption [Ziegler 1999] :

- Le couple de travail (réfrigérant / absorbant) ;
- Type de source de chaleur utilisé ;
- Nombre de paliers de pressions et l'arrangement interne des différents composants.

Une machine à absorption comporte différents éléments présentés à la Figure 4.4. On trouve dans un premier temps le condenseur|détendeur|évaporateur, dans lequel ne circule que le réfrigérant pur. Suite à cela, on trouve la connection à la compression thermique désorbeur absorbeur où va circuler la solution diluée de l'absorbant vers le désorbeur [Castaing-Lasvignottes 2001]. Le cycle de fonctionnement de la machine s'organise suivant 4 phases qui correspondent naturellement aux 4 compartiments. Au désorbeur ou générateur, une source chaude fournit la quantité de chaleur nécessaire pour la séparation de la vapeur et de la solution concentrée en LiBr. La pratique classique était d'utiliser du gaz naturel pour la désorption. L'installation de froid solaire reçoit donc un apport de chaleur à partir d'un champ de capteurs solaires thermiques.

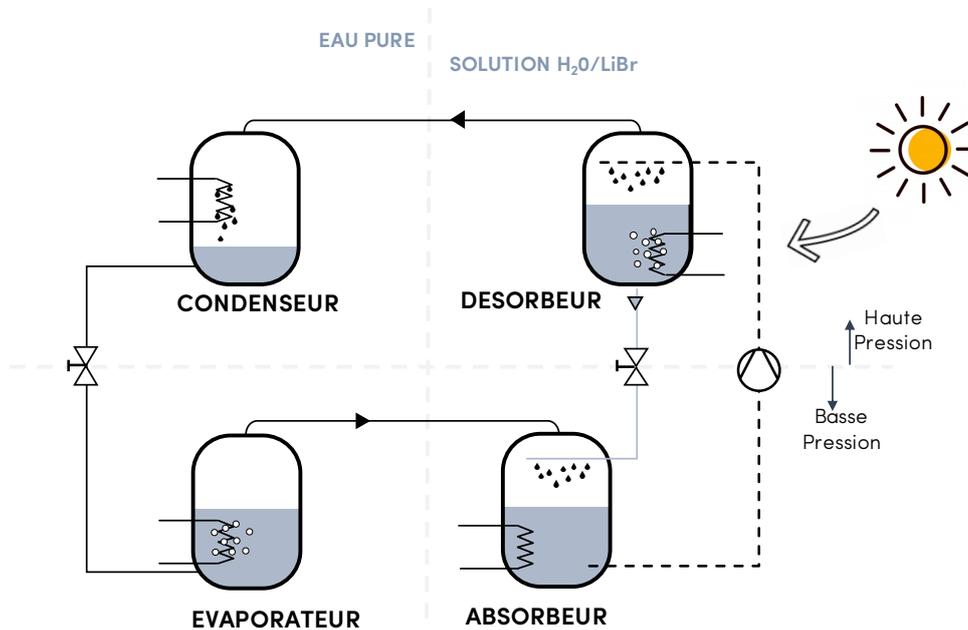


FIGURE 4.4 – Principe du froid solaire à partir d'une machine à absorption liquide

4.2.2.1 Capteurs solaires thermiques

La modélisation du capteur solaire thermique a été la première étape de mon travail. Pour ce faire, nous avons à la fois mis en place une plate forme expérimentale mais également, développé notre modèle numérique de capteurs solaires. Le choix du type de capteur dépendait essentiellement des contraintes d'installation dans le cadre du futur projet. Les capteurs solaires permettant de produire de la chaleur à une température supérieure à 80°C peuvent être plans à double vitrage ou sous vide. Le choix du capteur sous vide a été le nôtre pour la phase de modélisation car il permettait d'atteindre les températures de fonctionnement avec un encombrement réduit.

Le capteur modélisé est le CORTEC 2C de Giordano, qui est un capteur sous vide à circulation. Un banc d'essais de capteurs a été mis en place afin de permettre la validation expérimentale des différentes approches de modélisation (modèle permanent, dynamique et EN12975-2). Nous avons ainsi tester dans un premier temps le capteur dans les conditions de test de la norme EN 12975-2 [EN 2001] qui permettent de définir les caractéristiques des performances thermiques en régime permanent. Le rendement du capteur est défini comme suit :

$$\eta = \frac{P_u}{S \cdot I} = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{t_m - t_a}{I} - a_2 \cdot \frac{(t_m - t_a)^2}{I} \quad (4.1)$$

Avec t_m la température moyenne du capteur et t_a la température de l'air ambiant.

Ainsi le protocole expérimental permet de calculer la puissance utile extraite du capteur P_u et d'en déduire le rendement η en fonction de la surface S de l'absorbeur et du rayonnement solaire I . A partir des essais on peut alors déterminer les trois coefficients caractéristiques du capteur à savoir :

- η_0 est la facteur optique ou le rendement maximum ;
- a_1 et a_2 sont des coefficients de pertes thermiques indépendant et dépendant de la température, respectivement en $W/m^2 K$ et $W/m^2 K^2$.

Les résultats obtenus ont été comparés aux essais de la Solar Keymark , voir Figure 4.5. Les écarts entre nos deux essais sont relativement minimes. Cela nous a permis d'établir les coefficients de performance dans les conditions climatiques de la Réunion. Ces coefficients peuvent être dès lors utilisés dans les logiciels de dimensionnement tel que SOLO ou SIMSOL. L'er-

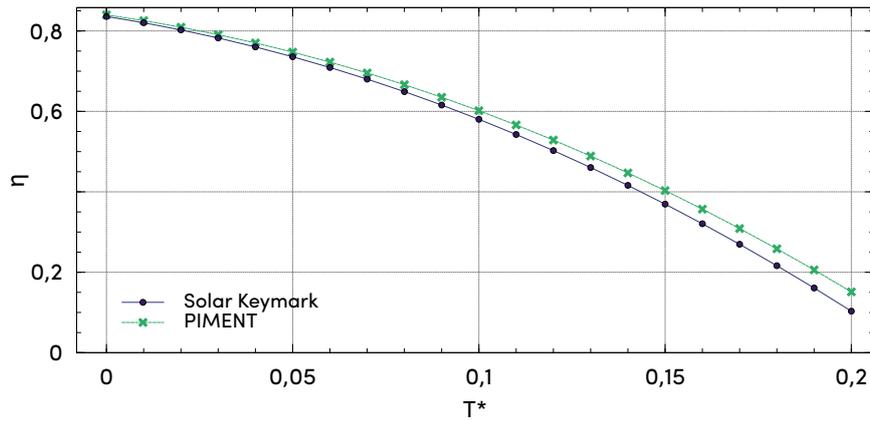


FIGURE 4.5 – Comparaison des courbes de rendement du capteur sous vide.

reur relative moyenne obtenue entre les deux courbes est de 5%. Cela montre bien la nécessité d'évaluer les performances du capteur selon les conditions climatiques du site afin de ne pas sous-estimer les performances de l'installation. Suite à cette première étape, le banc d'essai a permis de tester différents capteurs solaires dans les conditions d'ensoleillement de Saint-Pierre. Nous avons pu également constituer une base de données conséquente qui nous a permis de valider le modèle dynamique que nous présentons ci-dessous.

Le modèle de régime permanent est intéressant par sa facilité de mise en œuvre, cependant, il est clairement établi que ce type d'approche a tendance à surestimer les rendements réels. En phase de dimensionnement, le modèle s'avère suffisant, toutefois pour une modélisation en régime dynamique nous avons dû développer un modèle propre à notre capteur sous vide. Le modèle que nous avons proposé est une adaptation d'un modèle à trois noeuds d'un capteur plan vitré , [Duffie 1974, Kamminga 1985]. Ainsi le capteur est vu comme un tube, on discrétise donc le tube selon l'axe Ox. Les trois noeuds du bilan thermique sont ceux du vitrage (g), de l'absorbeur (p) et du fluide caloporteur (f). On obtient le système d'équations suivant :

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \varepsilon_g \sigma S_g (T_{sky}^4 - T_g^4) + h_{g-a} S_g (T_a - T_g) + \varepsilon_g \sigma S_p (T_p^4 - T_g^4) \quad (4.2)$$

$$C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \tau \alpha I_{\perp} + \varepsilon_g \sigma S_f (T_g^4 - T_p^4) + h_{f-p} S_p (T_f - T_p) \quad (4.3)$$

$$C_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + u \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = h_{f-p} S_{f-p} (T_p - T_f) \quad (4.4)$$

Où

f, g, p désigne respectivement le fluide, le vitrage et l'absorbeur du capteur.

ε représente les émissivités.

C désigne les capacités thermiques.

h représente les coefficients globaux d'échange.

I_{\perp} désigne le rayonnement perpendiculaire au plan du capteur.

σ est la constante de Stefan Boltzmann.

Un certain nombre d'hypothèses permettent de simplifier le modèle et par conséquent sa programmation. Ainsi la vitesse u du fluide caloporteur est supposée constante. On néglige les pertes à l'arrière du capteur. On fait également l'hypothèse que les termes de pertes thermiques varient de façon linéaire en fonction de la température. Enfin, les coefficients d'échange globaux sont considérés constants lors des simulations.

Comme le montre les résultats de la Figure 4.6, le modèle à noeuds suit globalement la dy-

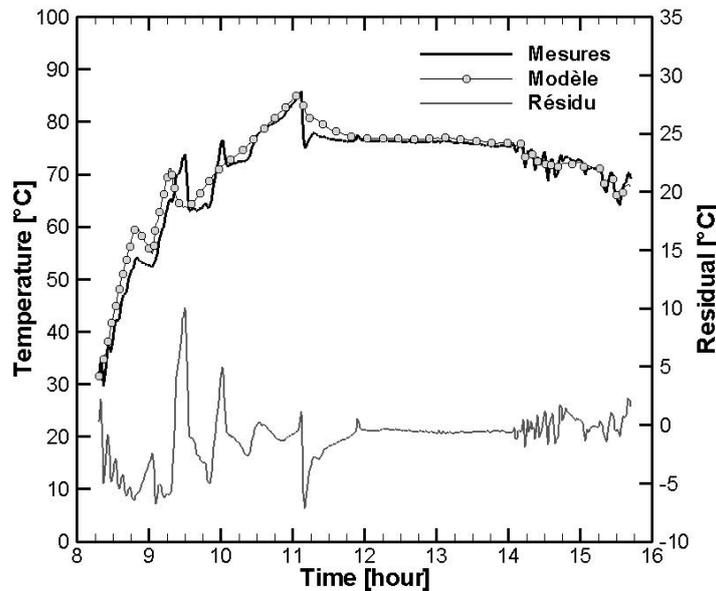


FIGURE 4.6 – Simulation du modèle à 3 noeuds du capteur sous vide.

namique générale des mesures. Toutefois, il est à noter que les variations brusques dues à la variabilité du rayonnement sont moins bien prise en compte par notre modèle. L'impact de ces écarts sont à nuancer car le champ de capteurs solaires est par la suite connecté à un ballon de stockage chaud. Ainsi, le ballon aura un effet tampon qui viendra lisser ces variations de température en sortie des capteurs solaires. La comparaison mesures | modèle est l'une des étapes de la validation de notre modèle de capteur. Nous avons apporté des éléments en trois étapes :

- **Test numérique** | Le modèle subit des variations des paramètres ou variables environnementales pour vérifier la prise en compte de ces changements brusques tel que

le rayonnement ou $(\tau\alpha)$ le produit de la transmittivité du vitrage et du coefficient d'absorption;

- **Comparaison Mesures-modèle** | Cette étape a permis d'ajuster le choix des formules des différents coefficients d'échanges ou paramètres du capteur;
- **Analyse de sensibilité** | On vérifie par cette méthode quels sont les paramètres les plus influents sur notre modèle.

Concernant l'analyse de sensibilité, nous avons procédé en deux étapes afin d'identifier quels paramètres sont les plus influents. La première approche est d'effectuer un screening par la méthode de Morris, [Morris 1991a] qui permet de savoir si un paramètre a une influence significative sur la réponse du modèle. Pour autant cela ne permet pas de classer l'ordre d'influence des paramètres. Une seconde approche, est une technique dérivée de la méthode FAST⁹, [Cukier 1973]. La méthode a été développée au sein du laboratoire dans les travaux de Mara, [Mara 2000, Mara 2008, Mara 2009] communément appelé TMA.

L'idée de la TMA est d'associer à chaque paramètre une signature qui lui est propre et représentée par une fréquence donnée. En considérant un modèle à une sortie (y) avec p paramètres d'entrée $y = f(x_1, x_2, \dots, x_p)$, les paramètres sont échantillonnés dans leur propre gamme de variation. Chaque paramètre x_h comprend une fonction périodique G_h caractérisée par une fréquence f_h . Ainsi, l'échantillonnage du paramètre x_h peut être exprimé par la formule suivante :

$$\mathbf{x}_{h,k} = G_h(\sin(f_h s_k)) \quad (4.5)$$

On se ramène ainsi à la détermination d'indices de sensibilité. Dès lors, il est possible d'identifier et de quantifier l'influence des différents paramètres sur la sortie du modèle. Pour chaque facteur, on définit un intervalle restreint de largeur centrée sur la valeur nominale du paramètre. L'évolution du facteur s'exprime de la manière suivante :

$$\mathbf{x}_{h,k} = x_{h,0} + \delta_h \sin(f_h s_k), \text{ avec } s_k = 2\pi k/N_s \quad (4.6)$$

où $k(k=1 \text{ à } N_s)$ représente le nombre de simulations, $x_{h,0}$ est la valeur nominale du paramètre h et δh est choisi tel que $\mathbf{x}_{h,k} \in [x_{h,0} - \delta_h, x_{h,0} + \delta_h]$.

En effet, comme nous pouvons le voir à la Figure 4.7, chaque paramètre est repéré par une fréquence. On peut alors déterminer à la fois l'influence du paramètre et ses couplages avec d'autres facteurs. Les fréquences choisies pour chaque paramètre sont faites de sorte que ces dernières soient incommensurables ce qui facilite la lecture du spectre et évite la superposition de fréquences. Les pics trouvés représentent donc un effet principal si le signal est impair. Dans le cas contraire, il traduit une interaction entre deux variables. L'intensité du pic représente le niveau d'influence du paramètre sur la réponse du modèle. Ainsi comme le montre la Figure 4.7, deux effets principaux sont particulièrement remarquables :

- 241 | Il s'agit du produit $\tau\alpha$ qui représente respectivement le coefficient de transmission du vitrage et l'absorption de l'absorbeur;
- 181 | Surface de l'absorbeur.

9. Fourier Amplitude Sensitivity Test

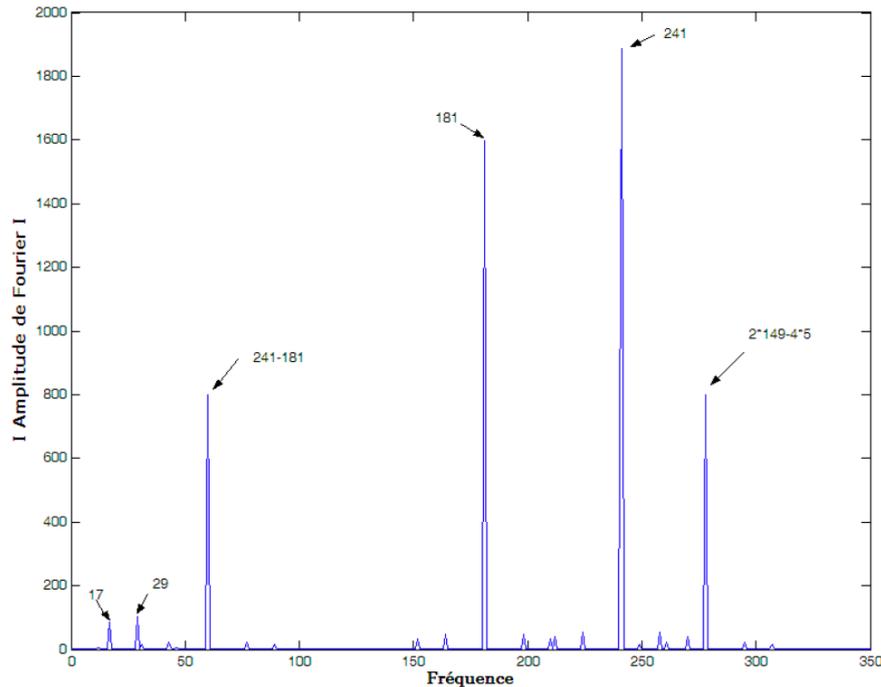


FIGURE 4.7 – Spectre obtenu par la méthode TMA à partir du modèle à 3 noeuds.

L'analyse de sensibilité nous permet de nous assurer qu'aucune l'influence supposée de nos facteurs dans notre représentation physique des phénomènes soit bien traduite dans le modèle mathématique. Les deux paramètres identifiés comme étant les plus importants montrent clairement le rayonnement solaire est le facteur qui va le plus influencer la température de sortie de notre capteur sous vide. Outre ces éléments de validation, l'analyse de sensibilité a permis la validation du modèle à 3 noeuds et de définir un métamodèle qui est un polynôme de régression. Ce métamodèle est une combinaison des différents facteurs du modèle. Ce travail a fait l'objet d'une communication, que l'on peut retrouver à la référence suivante [Praene 2005].

4.2.2.2 Modélisation de l'installation de froid solaire

La seconde partie de la thèse a été consacrée au couplage de l'ensemble des composants qui représente le système de rafraîchissement solaire. L'objectif était d'assembler sous un environnement commun la production de chaleur, de froid et les besoins du bâtiment. La littérature rapportait plusieurs études sur la simulation de ce type d'installations. [Ghaddar 1997] ont réalisé des simulations de maisons typiques à Beyrouth et ont défini un ratio de 23,3 m² par tonne de froid produit. Bien que l'efficacité du système soit avérée avec une fraction solaire de 43%, l'aspect économique est déjà identifié comme un frein par rapport au dispositif plus conventionnels pour la climatisation. De nombreux autres travaux se sont intéressés à l'optimisation du système de refroidissement par absorption [Florides 2002, Assilzadeh 2005, Casals 2006, Balghouthi 2008, Bermejo 2010]. Les différentes

études consistent en la comparaison des performances des types de capteurs solaires pour répondre à la demande de la machine à absorption. La plupart de ces études ont été mises en œuvre sous TRNSYS ¹⁰ [SEL 1975].

En France, la première thèse sur le froid solaire, [Mugnier 2002], a également utilisé le même environnement de simulation. De façon analogue à la littérature, les pas de temps de simulation étaient horaires correspondant aux fichiers météorologiques les plus communément disponibles. Les différents exemples trouvés ont assemblé les modèles appelés "TYPE" de TRNSYS pour constituer l'installation et le pilotage associé. Ainsi un profil des besoins en froid est associé à l'évaporateur de la machine à absorption.

L'environnement TRNSYS a été celui que nous avons retenu également pour la modélisation de l'ensemble de l'installation dont l'un des avantages majeurs est l'existence de nombreux composants (machine à absorption, ballon de stockage, régulation). Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, un modèle de capteur sous vide avait été développé, ce dernier a été traduit sous forme d'un type TRNSYS pour y être ajouté en tant que composant. De plus, l'originalité de nos travaux réside dans le couplage dynamique des besoins du bâtiment et de la production de froid solaire. Ainsi, nous n'avons pas défini une courbe de charge correspondant aux besoins en rafraîchissement, mais couplé directement aux résultats de simulation issus de la simulation. Cette approche nous a semblé plus judicieuse d'un objectif de modélisation et laisse la possibilité d'optimiser les éléments de l'installation. Nous avons fait le choix de ne pas utiliser le modèle Type 56 de TRNSYS du bâtiment, mais d'utiliser celui de CODYRUN développé au sein du laboratoire. CODYRUN présentait l'avantage d'avoir été validé pour des conditions climatique tropical humide. La Figure 4.8 donne une vue d'ensemble de la modélisation sous TRNSYS. [Boyer 1999a]. La transcription de CODYRUN

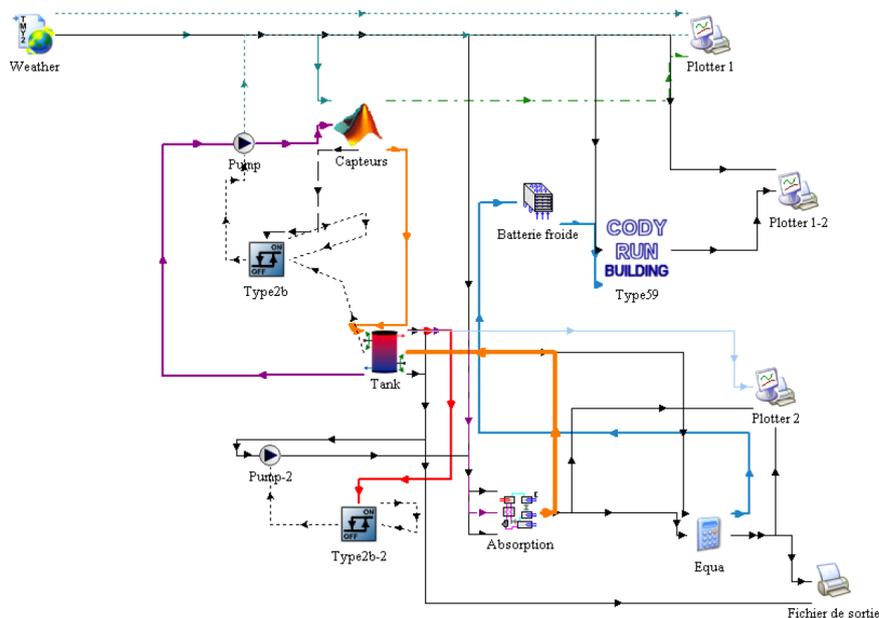


FIGURE 4.8 – Synoptique de la modélisation de l'installation sous TRNSYS.

sous TRNSYS a pris la dénomination du Type 59 a été effectuée en 2000, [Bastide 2001]. L'une des conséquences importantes a été de permettre de diminuer le pas de temps de simulation sans risquer une instabilité numérique comme il avait été souligné dans les travaux de thèse de Mugnier, [Mugnier 2002]. En effet pour des pas de temps inférieurs à 1/8^e d'heure, nous avons pu apporter une solution à ces difficultés de convergence et de couplage bâtiment/production de froid solaire.

Notre étude de cas s'est focalisé sur le rafraîchissement des salles de TD du Département Génie Civil. Nous avons couplé 60 m² de capteurs sous vide et un ballon de 800 L permettant d'apporter de la chaleur au désorbeur d'une machine à absorption de 35 kW_f. Les résultats

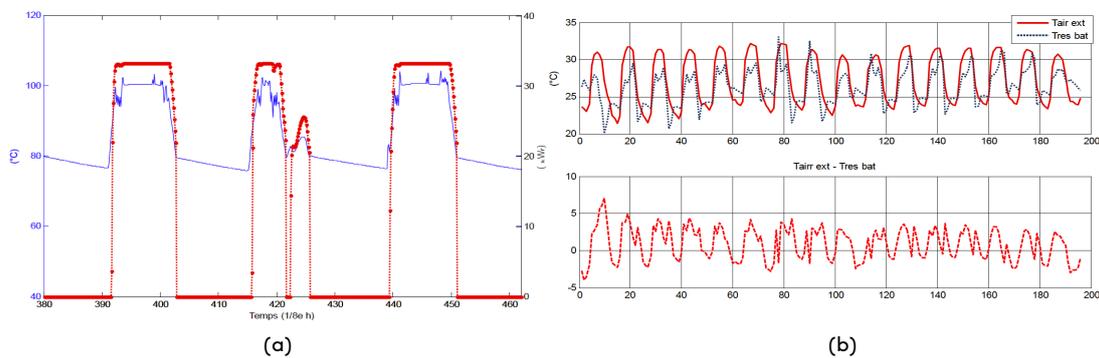


FIGURE 4.9 – (a) Production frigorifique et température en sortie du stock chaud – (b) Comparaison entre la température dans une salle de TD et l'air extérieur.

présentés à la Figure 4.9 montrent bien qu'il est possible de rafraîchir les salles de TD avec un écart moyen de l'ordre de 5°C entre l'air extérieur et intérieur. Les pratiques des prédimensionnements des bureaux d'études proposent un ratio 150 kW_f/m² de bâtiment, ce qui nous amènerait à un besoin de l'ordre 32,4 kW pour le département Génie Civil. Cela reste cohérent avec les valeurs obtenues sur la simulation de froid solaire. L'exemple proposé a porté sur le mois de janvier où la machine à absorption a pu produire 8,3 MWh.

Si nous avons eu recours à un dispositif classique de climatisation, en admettant un COP de l'ordre de 3, cela représentait un besoin électrique de 2,8 MWh, soit l'équivalent d'environ 410€. Ainsi, le bilan thermique de l'installation est positif. Compte tenu du mix électrique de la Réunion à l'époque, on évite un rejet de 1,89 tCO₂ dans l'atmosphère durant le mois janvier. Pour pouvoir situer cet impact, cela correspond presque à un trajet aller Paris – Réunion. A l'issue des différents essais et d'une optimisation des composants du système, nous avons obtenu la configuration suivante :

- Machine à absorption de 35 kW_f ;
- 60 m² de capteurs sous vide | soit un ratio 1,7 m²/kW_f ;
- Ballon de stockage 0,8 m³ | soit un ratio 0,023 m³/kW_f ;
- Débit dans le circuit primaire de 50 kg/hr m² de capteur.

Suite à cette configuration issue de la modélisation, des ajustements ont été effectués sur le pilote final. La machine retenue a été une Yazaki de 30 kW_f. Cependant, pour des raisons

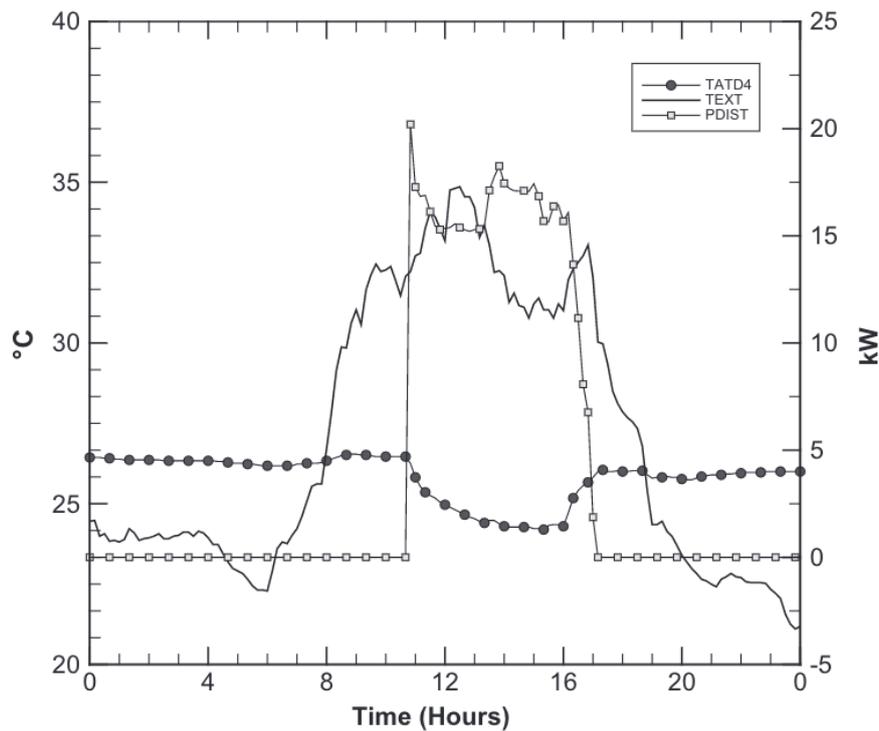


FIGURE 4.10 – Données expérimentales du pilote pour la salle de TD4 à l’IUT de la Réunion en 2008.

économiques, le choix de 90 m^2 capteurs double vitrage a été préféré à celui des capteurs sous vide (la surface nécessaire en toiture était disponible). En effet, le coût total du pilote expérimental s’élève à 224,5 k€. Le champ de capteurs solaires double vitrage représente 24% du budget total. Le choix des capteurs sous vide aurait induit un surcoût de 54k€. Les détails des premiers essais du pilote RAFSOL ont été présentés dans les travaux cités, [Praene 2011, Marc 2011]. Nous retiendrons que les premiers résultats ont fourni une puissance de 20 kW, notée PDIST sur la Figure 4.10 et qu’une optimisation de la boucle solaire a été nécessaire pour améliorer les performances de la production de froid.

4.2.3 Conclusion

Mes travaux ont permis d’introduire, au sein du laboratoire, la thématique des systèmes énergétiques renouvelables. L’étude du dispositif de rafraîchissement s’est faite dans une approche classique qui fait se croiser de façon quasi-systématique, la modélisation et l’expérimentation. Le retour d’expérience de l’installation a permis de mettre en évidence les avantages et les barrières de ce type de technologie dans le contexte local. En effet, dans un premier temps, d’un point de vue purement énergétique, l’efficacité thermique est positive car, globalement le système évite une quantité non-négligeable d’émissions de CO_2 dans l’atmosphère. Toutefois, lors des différentes campagnes expérimentales, le fonctionnement de la tour de refroidissement vient diminuer les performances de l’installation. Le COP_{elec}

de l'installation est de l'ordre de 0,3 contre 0,6 en performance thermique. Rappelons que le condenseur et l'absorbeur sont le siège de réactions exothermiques. Par conséquent pour maintenir les performances de la machine, il est indispensable de les évacuer à travers une tour de refroidissement.

L'environnement de simulation mis en place a été validé par l'installation expérimentale. Cela nous a conforté dans les choix d'une approche dynamique du dimensionnement qui permet d'ajuster au plus près les différents composants. Compte tenu des coûts élevés de ces pilotes, il est crucial de ne pas surdimensionner les installations pour des seuls objectifs de garantie de performance. En effet, le coût du kWh frigorifique de cette installation est très élevé par rapport à un coût conventionnel de climatisation.

D'autres travaux ont été menés pour prolonger nos investigations sur le froid solaire. Les travaux de thèses d'Olivier Marc [Marc 2010] ont permis d'optimiser l'installation notamment par une analyse exergetique des différentes parties du pilote. Cette analyse a permis notamment d'ajuster la régulation de l'installation et de définir de nouvelles stratégies de fonctionnement. Outre cette première approche analytique de modélisation des composants, j'ai également poursuivi d'autres modes de modélisation de la machine à absorption par les réseaux de neurones bayésiens afin de tester ces approches par apprentissage de données. Les résultats ont été présentés aux journées de formation SIMUREX.

Le fil conducteur des travaux initiés sur le rafraîchissement solaire au sein du laboratoire a été de mettre en œuvre un pilote qui permet d'accumuler un retour d'expérience et constituer des données à exploiter pour la modélisation. Un second aspect important a été la volonté de pouvoir transférer rapidement les connaissances au milieu professionnel. Le projet ANR MEGAPICS¹¹ visait ainsi à fournir aux professionnels (concepteurs, planificateurs, ...) un nouvel outil de dimensionnement simplifié, appelé PISTACHE¹², permettant à la fois la conception et la prévision des performances des systèmes de chauffage, de refroidissement et de production d'eau chaude sanitaire solaire. Ce travail a consisté, dans un premier temps, à valider le bilan énergétique annuel de l'outil PISTACHE par rapport aux données expérimentales réelles du RAFSOL puis à appliquer l'analyse de sensibilité afin de vérifier de tester l'influence des paramètres retenus, [Semmari 2014]. L'outil développé a permis d'obtenir des bons résultats et comportement dynamique cohérent par rapport aux données de RAFSOL, malgré une tendance à sous-estimer la production de froid solaire en moyenne 12,87%. En guise de synthèse, nous présentons ci dessous les retombés de ma recherche sur le froid solaire. Ce résumé se propose de présenter la plus value dans le cadre des travaux apportés selon trois aspects :

- **La valorisation scientifique** | J'y inclus les articles, congrès mais également toutes les communication de vulgarisation de mon travaux;
- **L'encadrement scientifique** | Cette aspect porte sur les encadrement de thèse, les suivi de doctorants, étudiants de Master ou ingénieur, mais qui n'ont pas forcément l'objet;
- **Formation** | Ce dernier point rend compte du transfert de connaissances en direction des étudiants mais également dans le cadre de la formation continue.

11. Méthode pour Garantir les Performances des Installations de Climatisation / Chauffage Solaire

12. Presizing tool for solar cooling, heating and domestic hot water production systems

VALORISATION – 4 articles en revue, 7 communications et 3 rapports ont été publiés sur la modélisation et l'expérimentation de l'installation de froid solaire. J'ai participé à 2 projets RAFSOL ET ORASOL sur le pilote et son optimisation. Un dernier projet MEGAPICS financé par l'ADEME, m'a permis de tester les outils de sensibilité sur les modèles développés.

ENCADREMENT – J'ai participé au suivi de deux thèses sur l'installation de production de froid solaire, celle d'Olivier Marc et de Blaise Letexier. J'ai encadré deux mémoires de Master 2, dont un en particulier sur le couplage avec un gazéifieur.

FORMATION – J'ai créé 3 UEs en L3 Génie Civil et Master Génie Civil, portant sur les bilans thermiques appliqués aux capteurs solaires (L3), la modélisation des capteurs solaires, l'analyse exergétique des dispositifs thermodynamiques renouvelables.

4.3 Problématique et positionnement de ma recherche

A l'échelle des grandes périodes (millions d'années) les facteurs qui influencent le changement climatique sont très nombreux : variation du rayonnement solaire, tectonique des plaques etc. À notre échelle de temps, l'impact de l'activité anthropique a eu des répercussions importantes sur la Terre d'un point physique, social, économique et environnemental, [IPCC 2007]. Le GIEC¹³ dans son rapport de 2014 [IPCC 2014], indique dans son avant propos une certitude à 95% des causes du réchauffement du fait de notre activité. Le rapport de 2018 du GIEC met en avant la feuille de route à mettre en oeuvre pour réussir les ambitions définies dans l'accord de Paris en 2015. En effet, celui-ci propose un cadre mondial pour prévenir d'un changement climatique dangereux en limitant le réchauffement climatique à un niveau bien en dessous de 2°C et en poursuivant les efforts pour le limiter en dessous d'un niveau moyen de 1,5°C à l'horizon 2040.

Comme le montre la Figure 4.11, contenir l'augmentation de la température à une moyenne de 1,5°C demandera le déploiement de mesures drastiques, [Tollefson 2018]. Pour ce faire, il sera primordial de pouvoir agir en amont sur les causes et en aval sur les effets. Il apparaît dès lors de façon assez triviale qu'une approche transdisciplinaire est nécessaire pour une appropriation de la compréhension des défis à relever. Ainsi, comme le souligne [Laukkonen 2009], il est indispensable de combiner de manière appropriée les efforts d'atténuation et d'adaptation pour un développement soutenable des territoires. Pour répondre efficacement à ces enjeux, les acteurs publics et les planificateurs ont besoin d'informations, de méthodologies et d'outils pour les aider dans leur processus décisionnel.

Dans ce qui précède, il a été mis en exergue l'importance de la compréhension de notre environnement et de notre société afin de construire une modélisation pour le long terme. Pour cela, il nous est indispensable de comprendre notre situation passée et présente. Il est également crucial de pouvoir diagnostiquer correctement les potentialités et faiblesses de notre territoire, les usages et pratiques courantes dans différents secteurs. De nombreux

13. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

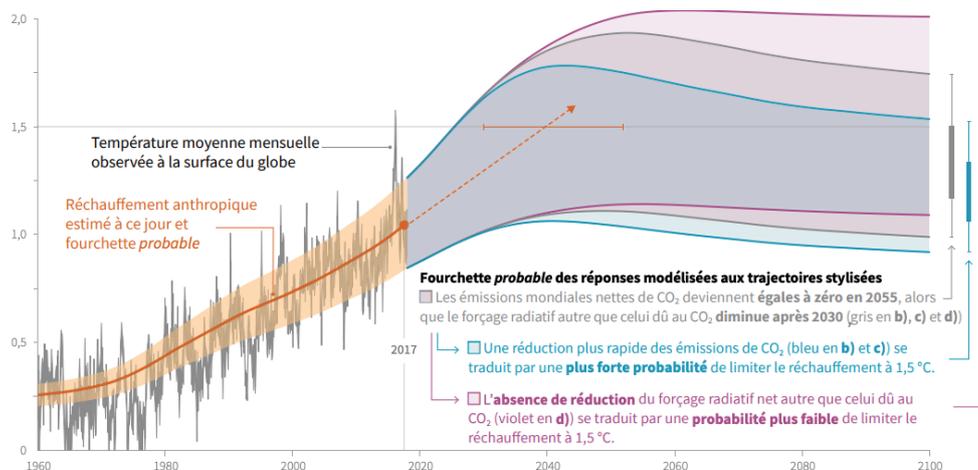


FIGURE 4.11 – Trajectoire historique et évolutions tendanciennes de l'élévation de la température de 1960-2100 – source [IPCC 2018].

travaux traitent de ces questions dans des domaines variés, à titre d'exemple : dans le secteur du bâtiment, on s'intéresse beaucoup aux flux d'énergie et aux technologies pour atténuer les crises environnementales. On parle ainsi de récupération d'énergie solaire, de production de biogaz, de traitement in situ des eaux usées, etc. [Hossain 2017]. Concernant la production énergétique renouvelable, des études de gisement sur de nombreux territoires existent et font une analyse de type SWOT des développements possibles. Un récent *systematic review* [Hansen 2019] a mis en avant la nécessité de se questionner sur le rôle des individus et des territoires dans la transition des micro systèmes énergétiques. Un autre enjeu majeur est le positionnement de cette recherche dans le cas de régions "marginalisées" tels que territoires pauvres ou des espaces insulaires, [Kang 2020]. Enfin, la littérature aborde de plus en plus une analyse à l'échelle des usagers, questionnant ainsi, la perception et les pratiques de la population vis-à-vis des changements à engager. Une étude de [Sovacool 2020] met en évidence le biais d'une approche purement technico-économique, de la transition bas carbone. En effet, il questionne le fait que la culture d'un pays ou d'un territoire peut s'avérer être une barrière majeure à cette transition et discute de l'appropriation de ces connaissances par les acteurs de l'énergie.

Les illustrations ci-dessus témoignent en quelque sorte de mon cheminement de chercheur au sein du laboratoire depuis 2010. Ainsi, je propose une lecture chronologique des différentes thématiques que j'ai souhaitées prospecter. Les cinq prochains chapitres aborderont les thèmes et les enjeux de la transition bas carbone au prisme des axes suivant :

- Évaluer les potentialités d'un territoire ;
- Comprendre les dynamiques territoriales et temporelles ;
- Penser et construire des environnements soutenables ;
- Modéliser le long terme ;
- Examiner notre impact sur notre environnement.

À l'issue de ces différents axes, je présenterai dans un dernier chapitre de synthèse, le fil conducteur des travaux que j'aurai menés ou dirigés. Cela permettra de mettre en évidence le sens de l'orientation de ma recherche, avec en particulier le positionnement de cette dernière dans le laboratoire PIMENT. Je dégagerai au final, ma vision et ma stratégie de recherche pour ces dix prochaines années.

Territoires et transition énergétique

Sommaire

5.1 Introduction	75
5.1.1 Le contexte national	77
5.1.2 Transition énergétique en milieu insulaire	78
5.1.3 La Réunion, une île en transition énergétique?	78
5.1.4 Madagascar, quelle transition énergétique pour la grande île?	82
5.1.5 Les Comores où comment s'engager enfin vers une durabilité énergétique?	87
5.1.6 Conclusion	92

DEPUIS les conférences sur le climat COP 21 à Paris et COP 22 à Marrakech en décembre 2016, la volonté de tendre vers une société bas carbone est de plus en plus au cœur des débats mondiaux. Dans ce débat, la pénétration des énergies renouvelables demeure un des leviers forts de cette transition énergétique, [Chen 2020a]. Même si ces productions dites "propres" ne font pas toujours l'unanimité, elles demeurent aujourd'hui la solution ultime d'une réponse à nos futurs besoins énergétiques, [Raineau 2011]. Ce chapitre résume les travaux que j'ai menés sur l'étude des potentialités des territoires en terme de production d'énergies renouvelables.

5.1 Introduction

L'énergie, élément clé du développement économique de nos territoires, est devenue un enjeu majeur de notre société. En trente ans, il s'est invité à la table des discussions politiques, des innovations technologiques, de la recherche transdisciplinaire forgeant ainsi la nécessité de l'anticipation de la fin des ressources actuelles et de regards croisés sur ce défi. Pourtant, la question de la nature finie des ressources fossiles n'est pas nouvelle. En 1866, dans son article "The Coal Question", [Jevons 1866], l'auteur pose la question suivante : " *Combien de temps le charbon peut-il soutenir l'industrie britannique ?* ". Ce questionnement peut aujourd'hui se transposer aux cas des énergies fossiles et de l'économie mondiale qui peut perdre sa dynamique du fait de la disparition des ressources actuelles [Polimeni 2015, York 2016]. Dépendance aux combustibles fossiles et réchauffement climatiques sont deux problèmes intrinsèquement liés, comme évoqué par [Bardi 2013], quels que soient nos choix à venir la

transition est déjà en cours. En effet, pour obtenir les mêmes quantités d'énergie, nous devons en consommer plus lors des processus d'extraction. Cela a induit une augmentation des coûts de l'énergie dans la deuxième moitié du 20^e siècle du fait de la pression de la demande industrielle [Fouquet 2011]. On ne peut donc imaginer de plus grand défi pour l'humanité que de quitter cette dépendance aux combustibles fossiles dans tous les secteurs : électricité, transport, agriculture, etc..Arrêtons nous quelques instants sur quelques éléments de concept de la *transition énergétique*.

Au mot "TRANSITION" est actuellement associé de nombreux épithètes tel que démographique, digitale, énergétique, écologique etc.[Millot 2019b]. Le terme "TRANSITION" désigne "un processus de transformation au cours duquel un système passe d'un régime d'équilibre à un autre" [Bourg 2015]. Toutefois, ce changement systémique, ne signifie pas pour autant de passer d'un état stable à un autre. [Chavance 1990] rappelle l'intérêt de garder une définition suffisamment ouverte permettant d'inclure les incertitudes liées à ce processus complexe de la transition. La notion de transition est déjà exposée au sein du rapport *Limits to growth*, [Meadows 1972], qui alerte sur la nécessité de la transition d'un modèle de développement axé sur la croissance vers un équilibre global. La notion de transition énergétique apparaît quant à elle dans les travaux d'Attiga qui questionnent la vulnérabilité économique des pays du tiers-monde vis-à-vis du pétrole [Attiga 1979]. Dès 1983, la Banque Mondiale insiste sur la nécessité de développer une meilleure gestion à la fois au sein des fournisseurs de l'énergie et au niveau national. La coordination des activités des fournisseurs et la promotion de la maîtrise de l'énergie est un point crucial [Kutcher 1983]. Le concept de transition est retrouvé dans le rapport de Brundtland [Brundtland 1987] à travers un bouquet énergétique diversifié et à faible impact environnemental. Bien que non cité directement dans les 17 SDGs¹ [GA 2015], ces derniers reprennent des objectifs de transition énergétique autour des notions de sécurité et justice énergétique, de diminution des coûts technologiques ou encore l'intensité énergétique des industries. Ces aspects sont en particulier abordés dans le SDG 7, [Villavicencio Calzadilla 2018].

Malgré son usage largement répandu, *la transition énergétique* souffre de nombreuses ambiguïtés qui rend aujourd'hui difficiles les débats et négociations entre ces États sur la scène internationale. Comme le souligne [Chabot 2015], la transition s'intéresse au renouvellement des pratiques en mobilisant de nouveaux moyens. L'approche temporelle de cette dernière se veut certes *irréversible*, mais pourtant, on lui confère un caractère cyclique qui permet de dessiner le processus comme un élément vivant à questionner et renouveler en continu à différents intervalles de temps [Smil 2010].

Ainsi, la transition énergétique est vue comme l'outil préconisé pour relever les multiples défis auxquels le système énergétique est confronté, tels que l'épuisement rapide des ressources, la pauvreté énergétique, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, etc. [Markard 2012, Dóci 2015]. Comme résumé dans les travaux de [York 2019], le seul focus sur le développement technologique des énergies renouvelables ne suffit pas à appréhender la question de la transition énergétique. Il est alors nécessaire de comprendre les potentialités physiques du territoire, le jeu des acteurs engagés dans le secteur de l'énergie, et comprendre qu'elles peuvent être les barrières pour ralentir cette dynamique de changement.

1. Sustainable Development Goals

Les travaux que je présente dans ce chapitre ont interrogé ces différents aspects afin de définir les contours d'un engagement dans le chemin d'une transition énergétique à l'épreuve des territoires. Mon d'observation et d'analyse évolue du système de production énergétique ou du bâtiment aux espaces bâtis ou le territoire dans son ensemble. Cette échelle est aujourd'hui indispensable, car elle nous permet de faire se côtoyer différents aspects de la transition écologique : technologique, socio-économique, environnemental, etc.

5.1.1 Le contexte national

Instaurée initialement en 2015 dans la LTECV², la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) de la France a été récemment revisitée en 2018-2019. L'ambition principale est une neutralité carbone à l'horizon 2050. Dans le secteur de l'énergie, l'accent est mis sur deux principaux aspects :

- Améliorer l'efficacité énergétique dans tous les secteurs d'activités et encourager la sobriété énergétique;
- Accélérer la pénétration des EnRs dans le mix électrique et supprimer à court terme le charbon;
- Garantir la sécurité énergétique : gestion plus pertinente de la distribution électrique, intégration de dispositif de stockage, lissage des pics de consommation électrique;
- Maîtrise le coût de l'énergie .

La feuille de route de la politique énergétique de la France est soutenue par un second document : la Programmation Pluriannuel de l'Énergie (PPE). Ce dernier fixe plus précisément les détails des mix électriques à atteindre dans le cadre du scénario défini dans la SNBC. L'arrivée de ce cadre naît d'un constat simple : la France n'est pas sur la bonne trajectoire vis-à-vis des objectifs de réduction d'émission à l'horizon 2050. En effet, La France connaît entre 2010 et 2012 une diminution de ses émissions, mais qui découle en réalité des effets de la crise de 2008 sur l'activité économique. Ainsi, l'un des éléments important de la LTECV, est la valorisation des territoires [Duval 2018]. On y voit d'une part un transfert des compétences au différents collectivités (Région, Département) et un encouragement du développement des TECPV³ visant ainsi une forte mobilisation des potentialités en ressources renouvelables de ces territoires. Cette articulation, entre ambition et déclinaison régionale de l'aménagement du territoire, s'appuie également, depuis les Grenelles de l'environnement, sur deux outils incontournables que sont les PCAET⁴ et le SRADDET⁵. Comme souligné par [Bénard-Sora 2018, Rüdinger 2017], la multiplication des documents stratégiques à différentes échelles font se collisionner les décisions, et complique l'opérationnalité et la cohérence de l'action. Au final, le pilotage de la transition place le territoire au cœur des enjeux à travers le diagnostic de ce dernier et l'utilisation de ses potentialités spécifiques.

2. Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte

3. Territoires à énergie positive pour la croissance verte

4. Plan climat-air-énergie territorial

5. Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires

5.1.2 Transition énergétique en milieu insulaire

Depuis près de cinquante ans les petites économies insulaires sont au cœur des discussions internationales [Angeon 2015]. En 1987, lors de l'assemblée générale des Nations Unies, la question de l'élévation du niveau de la mer est soulignée par le Président des Maldives [Wong 2010]. Les Nations Unies reconnaissent ainsi en 1992, les Petits États Insulaires en Développement (PEID) comme des territoires écologiquement fragiles et vulnérables. Ainsi, étant des zones les plus souvent non interconnectées à un réseau électrique continental, ces espaces insulaires concentrent de nombreux handicaps structurels dont les conséquences pèsent sur leur développement économique [Briguglio 1995, Sovacool 2011, Genave 2020]. Un des points remarquables commun à tous ces espaces est leur forte dépendance aux ressources fossiles pour la production d'électricité. Pour autant, ces territoires disposent de nombreuses ressources renouvelables. La littérature recueille de nombreux travaux traitant du potentiel de production électrique renouvelable. Un état de l'art des études de potentiel effectué par [Kuang 2016] relève que la plupart des îles ont principalement recours à l'hydroélectricité et à l'énergie solaire. Peu d'entre elles se sont orientées vers le développement de la biomasse ou encore de l'énergie des mers. De plus, la nature intermittente de ces ressources renouvelables porte un nouvel enjeu au stockage et à la gestion de la demande et de la distribution. La nature de ces espaces insulaires est également très variée. Outre les caractéristiques géophysiques, leur statut politique peut jouer un rôle sur les stratégies énergétiques et la capacité des îles à se transformer. Ainsi, dans cette partie de diagnostic des territoires, je me suis focalisé sur des îles de l'Océan Indien à savoir La Réunion, Madagascar et les Comores. Cette étape a été la première de notre travail de prospective. En effet, il est indispensable avant même de vouloir des scénarios et construire le long terme, de connaître la situation socio-économique du territoire et évaluer ces potentialités. Cette première partie de travaux, a donc une investigation de données de terrain, d'entretiens avec les acteurs de l'énergie et de collecte de supports/données en ligne afin de constituer un fond documentaire sur l'île étudiée. Cet état de l'art est d'autant plus important qu'il existe souvent peu d'informations fiables sur certains territoires et qu'il est alors obligatoire de faire une validation croisée des données récoltées. Les trois cas que nous présentons sont intéressants car au-delà du fait que ces îles sont toutes dans l'Océan Indien, elles diffèrent sur de nombreux aspects ; nous verrons malgré tout que les ambitions sont proches mais que les mises en œuvre sont rendues parfois plus complexes du fait des situations socio-économiques spécifiques.

5.1.3 La Réunion, une île en transition énergétique ?

Jusqu'à 2011, La Réunion était le seul DROM et la seule région ultrapériphérique de l'Europe dans la zone Océan Indien. L'île d'une superficie de 2512 km² concentre l'essentiel de sa population sur les côtes. En effet 80% de la population se situe à une altitude inférieure à 600 m. La croissance démographique est très soutenue. Nous sommes passés d'une population 450 000 habitants en 1970 à 853 659 en 2017. La Réunion est en fin de transition démographique et devrait se stabiliser en 2050 aux alentours de 940 000 d'habitants, selon les projections du scénarios central de l'INSEE [INSEE 2017]. Cette croissance démographique et le développement économique du territoire depuis les années 1980, ont induit une dépen-

dance progressive aux combustibles dans la production d'électricité.

Suite à la départementalisation en 1946, pour des raisons de coûts d'investissement, la Réunion dans un premier temps peine à se moderniser et se développer. L'électrification du territoire ne démarre qu'en 1961 par la centrale hydroélectrique de Langevin. Une seconde grande étape de l'électrification sera en 1975 avec la nationalisation de la production et la distribution de l'électricité, et la mise en service de la centrale Takamaka I (1968). Comme on peut le voir à la Figure 5.1, la Réunion a progressivement augmenté la part d'énergie fossile (charbon et diesel) dans son mix, cela correspond à la réponse rapide trouvée par les acteurs locaux pour répondre à une intensité énergétique de plus en plus importante. On voit ainsi sur le long terme les conséquences d'un manque de planification des besoins et de la mise en œuvre d'une stratégie de production le moins dépendant des importations de matières premières.

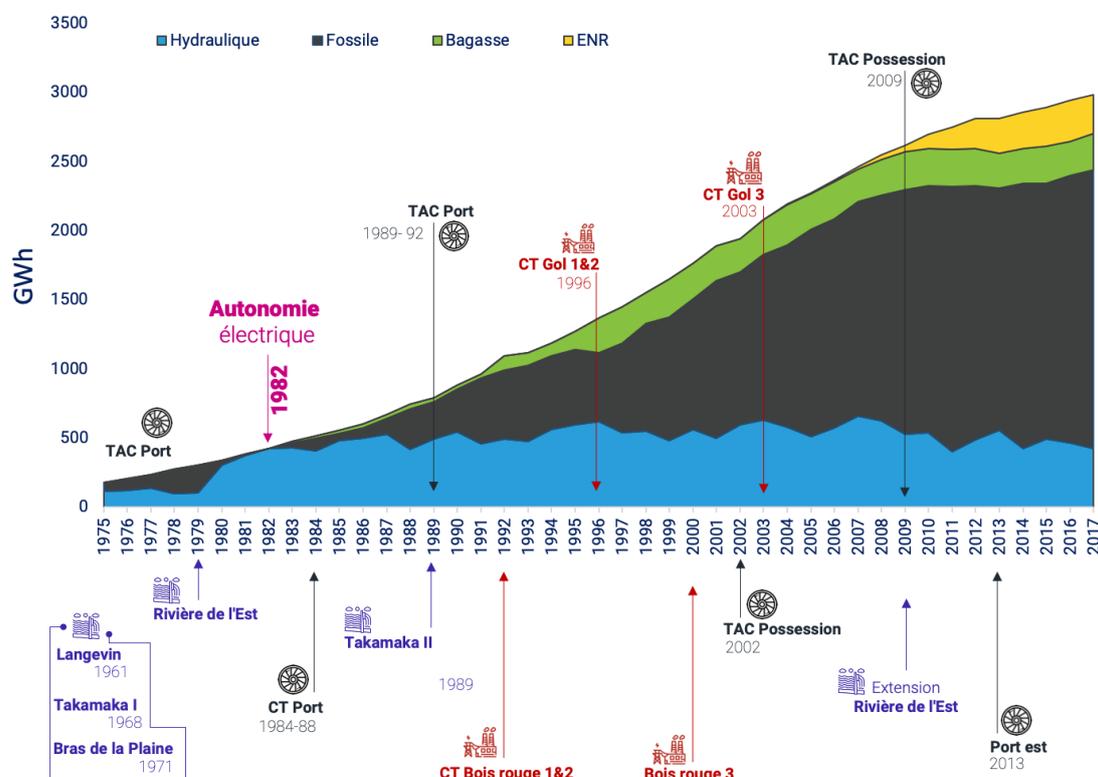


FIGURE 5.1 – Évolution historique de la production électrique à la Réunion

La courbe d'évolution montre bien que, hors part hydroélectrique, la part des EnRs a commencé en augmentant de façon significative à partir de 2009. Toutefois, le taux de pénétration des EnRs ne présente pas de signe traduisant une vraie amorce de la transition énergétique. Pour rappel en 2000, la part des EnRs était de 46,7%, contre 31,2% en 2019. Ce taux est quasi-statistique depuis 2009. Il est important de se souligner que l'intensité énergétique a beaucoup évolué en 10 ans, passant de 1,26 en 2008 à 1,41 MWh/hab en 2018. Cette augmentation de l'intensité énergétique a pour conséquence la plus importante une part importante des ressources fossiles comme le montre la Figure 5.2. Le charbon, le fioul et le diesel représentent

64% de la production et ce taux peinent à diminuer depuis plus de 10 ans.

La question de l'autonomie énergétique n'est pas nouvelle à la Réunion et elle précède

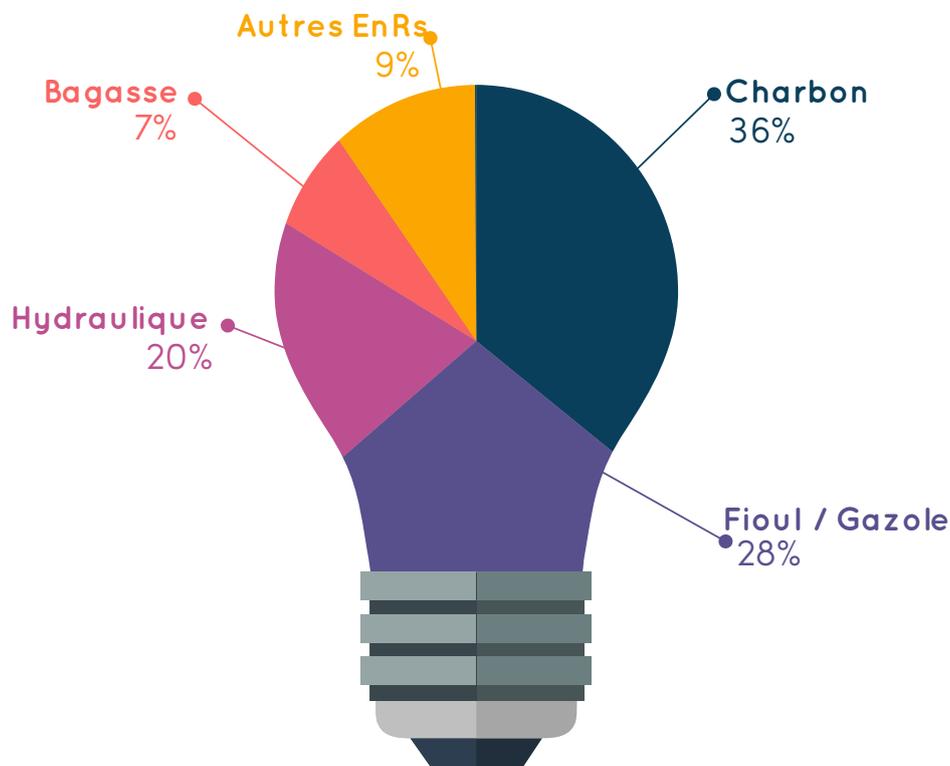


FIGURE 5.2 – Mix de la production d'électricité à la Réunion en 2018.

même les débats récents sur le changement climatique. Lors de sa création en 1959, le Parti communiste réunionnais établit une première ébauche d'un programme d'autonomie de l'île [Gauvin 2000]. En 1975, soit moins trois ans après "*Le premier Sommet de la Terre*"⁶, ce manifeste est mis à jour et compte différents documents intitulés "Plan de Survie", "Autonomie", "Égalité et développement", "Pacte pour un développement solidaire". On y découvre dans ses lignes directrices d'émancipation, les préconisations du PCR dans "Le plan de survie" sur la valorisation de la bagasse et le déploiement des EnRs pour atteindre une autonomie énergétique [Labache 2017]. Cette ambition est amplifiée par la Région Réunion sous la gouvernance de Paul Vergès (1998–2010), qui définit dans son PRERURE, les objectifs d'une autonomie énergétique à l'horizon 2030 [Vergès 1993]. La Réunion s'engage dès 2000 sur la voie de cette autonomie, avec l'ambition de faire de l'île un laboratoire d'expérimentation des technologies et des stratégies de planification énergétiques.

5.1.3.1 Potentiel en énergies renouvelables

Hormis l'hydroélectricité qui est la ressource historique et qui représente près de 20% de la production énergétique, la ressource solaire est aujourd'hui l'une des plus utilisées. L'île

6. Conférence de Stockholm (1972)

bénéficie d'un ensoleillement annuel de l'ordre de 1400–2500 h. Ce fort potentiel, a vu le développement des systèmes d'eau chaude solaire (ECS) et de photovoltaïque(PV). Fin 2018, on compte près de 46 000 m² de dispositifs ECS installés pour une production d'eau chaude de 275,7 GWh. La Réunion se classe au 1e rang européen en termes de ratio d'ECS installés de 0,777 m²/hab. Ce développement fort s'explique par dispositif financier incitatif pour l'acquisition des dispositifs. La RTAADOM⁷ a permis d'imposer une part de plus de 50% d'apport issu du solaire pour les logements. Le PV a connu une période très active en 2010-2014 en particulier sur les champs photovoltaïques. La tendance quasi asymptotique des puissances raccordées est également due à une limite de 30% d'énergie intermittente injectée sur le réseau. Cette limite est fixée pour les ZNI⁸ françaises, afin de sécuriser la fiabilité du réseau. À titre indicatif la puissance raccordée a évolué de 173,1 MW en 2014 à 190,4 MW en 2018. L'énergie éolienne quant à elle est vraiment peu présente malgré un potentiel fort sur la zone littorale sud soumise aux *Alizées*. En 2018, la production était de 12,8 GWh pour une puissance installée de 16,5 MW soit moins de 2% de la production totale. L'île compte deux fermes depuis 2005 qui devraient être renouvelées d'ici 2023, mais aucune extension n'est prévue. Toutefois la modernisation du parc va permettre d'augmenter la capacité de 25 MW et de diminuer le nombre d'éoliennes. Le Tableau 5.1 résume l'évolution du mix électrique de la Réunion. On voit ainsi bien que l'augmentation de la demande en électrique a été principa-

TABLE 5.1 – Comparaison du mix électrique 2008 et 2018.

	2008		2018	
	Puissance installée (MW)	Production (GWh)	Puissance installée (MW)	Production (GWh)
Fioul /Gazole	228	338,7	291	817,6
Chargon/ Bagasse	210	1550,4	210	1259,6
Fioul - Bioéthanol	-	-	41	2,3
Hydraulique	121	632,1	133,2	601,4
Eolien	16,4	13,5	16,5	12,8
Biogaz	2	-	4,4	12,7
Photovoltaïque	9,9	10,67	190,4	253,3
Batterie NaS	-	-	6	-0,8
Total	587,3	2545,7	892,5	2958,9

lement compensée par l'apport d'énergie fossile. Comme fait marquant, on notera la part du photovoltaïque qui a augmenté de façon significative. L'un des grands absents de ce développement des ressources demeure les déchets qui restent sur un usage faibles de production de méthane au niveau des ISDND⁹. D'autres investigations expérimentales concernent la gazéification de résidus agricoles. Au sein de notre laboratoire des expérimentations sont en cours sur un pilote évaluant le potentiel des ordures ménagers résiduels. L'utilisation de l'énergie thermique des mers a été investiguée pour la production d'électricité, au titre de prototype à travers les travaux de [Sinama 2011, Sinama 2015, Sinama 2016]. Cette ressource se trouve être une des plus prometteuses, car elle nous affranchit de la question de l'intermittence. À

7. réglementation thermique acoustique et aération DOM

8. Zone Non Interconnectée

9. Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux

l'heure actuelle, seul un SWAC ¹⁰ est prévu avec le CHU de Saint-Pierre dans le sud à l'horizon 2023. Ce dispositif devrait réduire les besoins en électricité dus à la climatisation de près de 30% (environ 9600 MWh) soit l'équivalent 6 800 habitants.

5.1.3.2 Planification énergétique

Comme souligné dans les travaux de [Selosse 2018] et défendu par Paul Vergès [Vergès 1993] dans son ambition d'une autonomie énergétique, la Réunion peut être un laboratoire et un terrain d'expérimentation vitrine pour le monde entier des bonnes pratiques et stratégies à mettre en œuvre. Nous concentrons sur 2512 km² de nombreuses contraintes physiques et structurelles et dans le même temps de nombreuses opportunités pour réussir notre transition. Toutefois la mise en marche de cette transition ne semble pas montrer de signes encourageants d'une dynamique. Parmi les sept barrières identifiées par [Painuly 2001] à la pénétration des EnRs sur un territoire, la Réunion concentre deux d'entre elles qui peuvent expliquer cette stagnation selon, [Praene 2012, Bénard-Sora 2018]. En effet, les expériences réussies d'EnRs (ECS, PV) à la Réunion sont toutes liées à des mécanismes incitatifs financiers (défiscalisation, tarif de rachat de l'énergie, etc.). La disparition de ces outils représente aujourd'hui un véritable frein à la relance des EnRs sur l'île. En second lieu, la taille des marchés est une véritable barrière dans les orientations stratégiques et scénarios à définir. On arrive ainsi à des résultats où l'autonomie de la Réunion n'est alors vue qu'au prisme d'un déploiement massif du PV, n'offrant plus l'opportunité d'un véritable bouquet énergétique. À cet égard la valorisation des déchets offre une des perspectives des plus encourageantes au regard du retour sur investissement des technologies associées.

5.1.4 Madagascar, quelle transition énergétique pour la grande île?

Madagascar surnommée "*la Grande île*" n'a rien de comparable avec les autres petites îles de l'Océan Indien. Son territoire d'une superficie de 587 295 km² est caractérisé par une forte hétérogénéité spatiale sur plusieurs aspects : climatique, économique, ressources, etc. La population totale s'élève à plus de 27 millions (dont 36,5% est en zone urbaine). Cet état est économiquement fragile du fait de l'instabilité politique récurrente qu'il subit depuis plus de 30 ans. Comme le décrit [Razafindrakoto 2014] l'histoire du pays met en avant l'incapacité des gouvernements successifs à définir un consensus politique stable. Au fil du temps des écarts ou clivages se sont creusés et semblent aujourd'hui quasi irréversibles : capitale vs provinces, zones rurales vs villes etc. [Razafindrakoto 2015].

Les conséquences de ces conjonctures politiques sont à la fois un ralentissement économique et un affaiblissement d'une population déjà très vulnérable, voir la Figure 5.3. Actuellement, 70% de la population totale vit en dessous du seuil de pauvreté (moins de 2 \$/jour). Pour remettre l'économie sur un chemin de croissance saine et durable à un niveau au moins égal à 5%, le FMI a décidé en 2016 d'accorder une facilité de crédit étendue de 305 millions de dollars. Ce fond était adossé à un programme de réforme sur trois ans (2016-2019), dont l'énergie est

10. Sea water air-conditioning

l'une des pierres angulaires. Dans ce contexte, le secteur de l'énergie semble présenter un intérêt considérable dans le sens où cette ressource est nécessaire à la croissance de tous les secteurs productifs du pays. L'indicateur Doing Business classe Madagascar au 185^e/190 en 2019 pour l'accès à l'électricité [Bank 2019c]. Ainsi, le développement du secteur de l'électricité est le principal défi énergétique du pays pour les dix prochaines années. À l'image

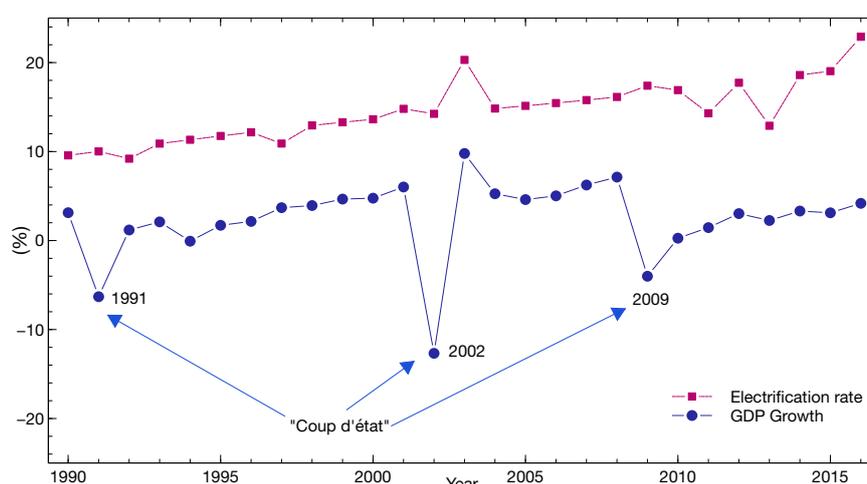


FIGURE 5.3 – Taux d'électrification et croissance du PIB de 1990 à 2017, source [Bank 2019b, Bank 2019d]

de la société, on observe une fragmentation du territoire. Ces inégalités se retrouvent également dans la problématique de l'électricité. En effet, le territoire doit faire face à plusieurs challenges :

- En *zone rurale*, les ménages sont en général très pauvres et la densité de population est très faible, ce qui ne suscite pas l'intérêt des investisseurs [Almeshqab 2019]. Ainsi, l'objectif est de viser une production autonome renouvelable en s'appuyant sur les atouts spécifiques à chaque région [Scott 2016] ;
- En *zone urbaine*, l'un des principaux problèmes dans les grandes villes est la sécurité énergétique. En effet, les délestages et dysfonctionnement sont courants du fait de nombreux raccordements "sauvages" et l'obsolescence du réseau de distribution.

En zone urbaine, seul 50% de la population a accès à l'électricité, ce taux chute à moins de 5% [Levet 2019]. Ce taux n'a cessé de diminuer depuis 2010 du fait des problèmes structurels évoqués ci-dessus. Cette situation demeure alarmante, car le parc de production se dégrade fortement, par manque de maintenances régulières des différentes installations. A titre d'exemples les centrales hydroélectriques datent de plus 30 ans.

5.1.4.1 Situation énergétique de Madagascar

La production électrique est essentiellement réalisée par une société nationale la JI-RAMA¹¹, qui est en situation de monopole depuis 1975 sur la production et la distribution

11. JIro sy RAno Malagasy

électrique. L'ADER¹² assure, avec l'appui d'une trentaine d'opérateurs privés, l'électrification de milieux ruraux. Selon l'inventaire énergétique établi par le [WWF 2012] et le rapport de la CREAM¹³ [Voninirina 2014], le bois-énergie demeure le combustible le plus important (92%) dans l'approvisionnement énergétique total. La part d'énergie fossile s'élève à 58,7%, car l'hydroélectricité est la ressource qui permet d'avoir à ce jour 40% d'énergie renouvelable, ce qui représente une émission dans l'atmosphère de l'ordre de 581 g CO_{2eq}/kWh. Cette part élevée du bois-énergie s'explique par son accessibilité en zone rurale et son faible coût pour la population. Le bilan énergétique de Madagascar en 2017 montre une structure de

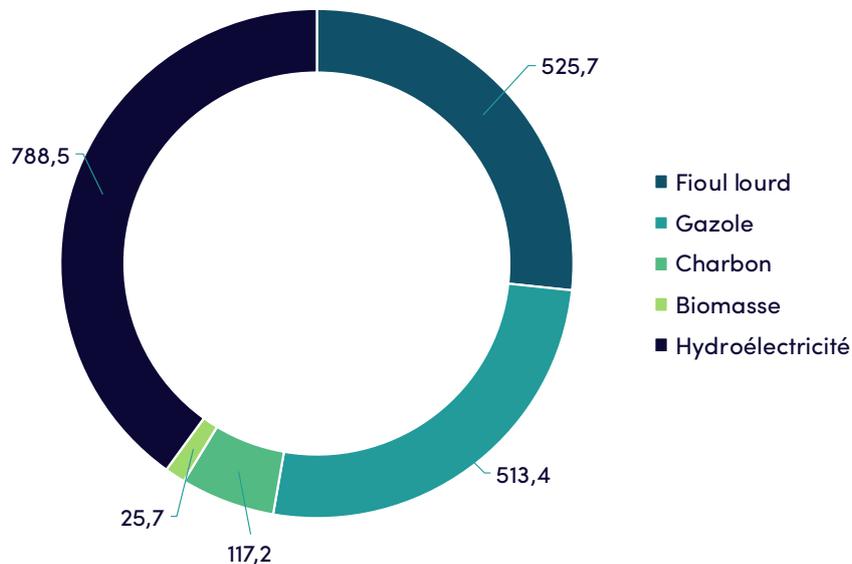


FIGURE 5.4 – Structure de la production d'électricité 2017 en GWh, [SIE 2017].

la consommation d'électricité principalement orientée autour du secteur résidentiel (55%), de l'industrie (24%) et du secteur tertiaire (14%). Malgré la forte dépendance actuelle aux combustibles fossiles, Madagascar a un potentiel considérable pour l'hydroélectricité à faible capacité. Le potentiel hydroélectrique a été estimé à environ 7,8 GW. Aujourd'hui, seulement 2% de ce potentiel est exploité. En 1990, les centrales hydroélectriques représentaient 71% de la production totale et les centrales thermiques seulement 29%. Au fil des ans, le pays a eu de plus en plus recours aux centrales thermiques pour assurer les augmentations de la demande d'électricité. En 2015, 39% de la production est assurée par les centrales thermiques, et les centrales hydrauliques, environ 61%. L'utilisation de centrales thermiques a une incidence considérable sur le prix de l'électricité ; le prix est plus bas et plus stable dans les régions où les centrales hydroélectriques soutiennent la production que dans les régions principalement alimentées par des centrales thermiques. Un nombre croissant d'installations photovoltaïques permettant de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire sont en train d'apparaître

12. Agence de Développement de l'Électrification Rurale

13. Centre de recherche, d'études et d'analyse économique à Madagascar.

dans les zones rurales. Cependant, la part des énergies renouvelables reste marginale. Afin d'évaluer précisément le potentiel en EnRs de Madagascar, nous avons, durant deux ans, mené une campagne de terrain afin de collecter des données auprès des institutions publiques et différents acteurs de l'énergie. Ces travaux ont fait l'objet d'un article [Praene 2017a], je propose les grandes lignes et les principales conclusions ci-dessous.

- Ouest | zone chaude et sèche avec un fort potentiel solaire ;
- Est | zone chaude et humide sous aux vents ;
- Les Hauts plateaux | zone sèche et froide.

Ces disparités climatiques sont à considérer dans la stratégie de diversification du mix énergétique renouvelable de Madagascar. À l'heure actuelle, l'hydroélectricité est l'une des solutions les plus prometteuses pour augmenter la capacité renouvelable. En effet au cours de ces 15 dernières années la production moyenne est de l'ordre de 660 GWh/an. La topographie des hauts plateaux est particulièrement adaptée à l'hydroélectricité. Une étude de [Ramarojaona 2011] estime à 337 km³ le volume exploitable. Le réseau de rivières associé est de plus de 3000 km. Avec une superficie de 365 000 km² représentant 62,2% de la superficie de Madagascar, le versant ouest présente de nombreux sites potentiels par rapport au reste de l'île. Par ailleurs, en l'absence de données pertinentes, la nature de certains sites est encore indéfinie, bien que leur potentiel hydroélectrique soit connu.

Concernant le solaire, le potentiel est important avec une moyenne de 2000 kWh/m² pour le rayonnement global horizontal. Cette valeur varie de 4 000 à 6 500 sur la côte ouest de l'île. Malgré ce gisement solaire élevé, le développement de systèmes d'énergie solaire reste difficile en raison de l'importance des investissements initiaux. En mars 2016, Madagascar a rejoint le programme Scaling Solar de la Banque mondiale, qui prévoit la construction de centrales solaires de 30 à 40 MW afin de réduire les délestages quotidiens et les interruptions de la distribution d'électricité. L'énergie solaire est actuellement utilisée pour développer l'électrification rurale. On trouve ainsi de nombreux kits PV avec stockage qui permettent de répondre aux besoins "primaires" des foyers ruraux.

L'énergie éolienne présente un potentiel intéressant sur les zones côtières nord (région d'Antsirana) et sud. Cependant, deux obstacles sont à prendre en compte : le premier est la végétation tropicale qui peut être relativement dense et le second plus contraignant est la récurrence des épisodes cycloniques durant l'été austral. Deux types d'installations sont actuellement utilisées à Madagascar, à savoir des éoliennes de pompage d'eau et des éoliennes électriques. Les deux sont principalement importées et seul l'assemblage est fait localement. Ces éoliennes sont localisées essentiellement en milieu rural ou en périphérie des grandes villes [Beguerie 2009]. Cependant, les enjeux du développement de l'énergie éolienne à Madagascar se situent sur trois points principaux : les barrières commerciales et financières, la distance entre les sites potentiels et le lieu de consommation, et la faible densité de population. De plus, les sites éoliens potentiels sont éloignés des villages et des lignes de transport nécessitent des dépenses supplémentaires, ce qui augmente le coût du développement. Cette faible densité des habitations en milieu rural augmente les coûts de distribution et à cela s'ajoute la faible capacité de paiement des ménages. Ainsi, le faible taux de facturation entraîne un prix élevé du kWh électrique. Afin de promouvoir l'énergie éolienne, les autorités locales devraient appliquer une exonération fiscale sur le matériel lié à la construction d'éo-

liennes et une réduction d'impôts pour les entreprises qui ont l'intention d'investir dans cette technologie à Madagascar [Beguirie 2009].

Nous avons étudié d'autres potentialités telles que la géothermie et l'énergie de la mer. Le territoire dispose de gisements intéressants toutefois, le coût de la technologie est un frein important. À titre d'exemple, entre 2010 et 2019, la géothermie est passée de 0,049 à 0,073 USD/kWh [IRENA 2020], ce qui, compte tenu du contexte socioéconomique du pays, exclut quasi définitivement cette solution. Nous allons aborder les grandes lignes de la planification énergétique de Madagascar portées par les politiques

5.1.4.2 Politique énergétique : l'ambition d'émergence du pays ?

La définition d'une politique énergétique est relativement récente à Madagascar. La première étape a été de définir la Nouvelle Politique Énergétique (NPE) 2015-2030. La NPE s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre du Plan National de Développement (PND) 2015-2019. Elle vise à "répondre aux défis économiques, sociaux et environnementaux urgents du pays". Les trois sous-secteurs énergétiques abordés dans le NPE sont la biomasse, l'électricité et les hydrocarbures. Visant à la fois à préserver l'environnement et à développer les EnRs, l'objectif est de garantir la sécurité et l'indépendance énergétique du pays par la diversification du bouquet énergétique et la réduction des importations d'hydrocarbures. Un élément incontournable est également l'exploration des différents gisements possibles de ressources énergétiques suivant les régions de Madagascar. L'adaptation et le renforcement du cadre réglementaire et institutionnel et de l'environnement des affaires sont nécessaires pour réaliser la vision de la NPE. Il est, en effet, indispensable d'assurer une coordination efficace entre les différentes entités impliquées dans la relance du secteur énergétique ; i.e. les ministères ainsi que les partenaires publics et privés, [Ministère de l'Énergie et des Hydrocarbures 2015]. L'Initiative Émergence pour Madagascar (IEM) du président malgache tout récemment élu est une vision ambitieuse du territoire pour l'année 2023. Cette nouvelle politique vise à engager le pays à être un territoire résilient à la volatilité du marché international de l'énergie d'ici 2023. Des pays émergents comme la Chine ont inspiré le modèle de développement de l'IEM. Ce nouveau plan vise avant tout à contribuer au développement futur et à la prospérité pour tous en l'espace d'une génération. Cette vision de l'obtention du statut de pays émergent repose sur les réformes économiques approfondies nécessaires pour passer d'une économie informelle à une économie qui exporte des produits finis à forte valeur ajoutée. Comme dans tous les pays d'Afrique et d'Asie qui sont dans la phase émergente ou qui ont réussi leur transition, cette transformation nécessitera des réformes structurelles profondes pour améliorer les compétences et les performances. En ce qui concerne la question de la situation énergétique, aucune planification précise n'a encore été établie. Les seuls objectifs quantifiés sont, d'une part, de faire passer le taux d'électrification de 16% à 50% d'ici 2023. D'autre part, au début de 2019, plusieurs projets de construction de centrales hydroélectriques ont été planifiés dans le but de contribuer à la pénétration des énergies renouvelables dans le mix électrique. Outre le développement des EnRs, le projet IEM vise également à maîtriser le coût de production de l'électricité, qui est l'un des plus élevés de la région de l'océan Indien. Le dernier point lié à l'énergie dans l'IEM est la garantie de production, qui vise à limiter le risque de délestages récurrents dans les grandes villes malgaches.

5.1.5 Les Comores où comment s'engager enfin vers une durabilité énergétique ?

L'Union des Comores est un petit archipel situé dans l'océan Indien, dans le canal du Mozambique, entre la côte orientale de l'Afrique et l'île de Madagascar. La géographie de l'archipel est très variable et se compose des îles suivantes :

- Ngazidja (i.e., Grande Comore) : La plus grande île des Comores avec une superficie approximative de 1 148 km². Elle contient de vastes plaines et un volcan actif qui s'élève à environ 2 500 m au-dessus du niveau de la mer ; par conséquent, Ngazidja est une île volcanique couverte de cendres pouzzolaniques. Les activités économiques et administratives des Comores se situent principalement sur cette île.
- Ndzuani (i.e., Anjouan) : La deuxième plus grande île des Comores avec une superficie d'environ 424 km². Cette île est très montagneuse avec de nombreuses rivières et chutes d'eau.
- Mwali (i.e., Mohéli) : La plus petite île des Comores avec une superficie d'environ 112 km². Cette île est très argileuse et est principalement couverte par une forêt subtropicale.

La population des Comores est jeune et en forte croissance, elle était estimée à environ 800 000 citoyens [C.E.A 2017]. 70% des personnes vivent dans des zones rurales, mais un exode rural considérable (38,6% des zones rurales) vers les zones urbaines est observé depuis 2016. Ainsi, parmi toutes les nations africaines, l'archipel a une densité de population relativement élevée [B.A.D 2017]. Les Comores est l'un des pays les plus pauvres d'Afrique, avec un HDI¹⁴ de 0,497 en 2015, ce qui les place au 160e rang sur 188 nations africaines. Selon le rapport de la Banque mondiale sur l'évaluation de la pauvreté [Bank 2017], les conditions de vie se sont améliorées de manière significative au cours des deux dernières années grâce aux réformes structurelles engagées dans le cadre d'un climat politique récemment stable. Néanmoins, le PIB par habitant est encore faible en 2016 avec une valeur de 698 USD. Ainsi, les fonds transférés par les expatriés, qui représentent plus de 20% du PIB total, sont essentiels et fondamentaux pour l'équilibre de l'économie comorienne.

5.1.5.1 Vue d'ensemble de la situation énergétique

Avec une situation insulaire fortement caractérisée par des inégalités spatiales entre les trois îles en termes de sécurité énergétique et de développement économique, la question de l'électricité verte reste un enjeu important pour l'Union des Comores. Le plus grand défi est de concilier la qualité de l'approvisionnement électrique avec une décarbonation du mix électrique. Le secteur de l'électricité doit élaborer des stratégies essentielles pour résoudre les problèmes de financement, de gestion et de gouvernance qui continuent à entraver le développement des énergies renouvelables. Par rapport à d'autres îles de l'Océan Indien, telles que Maurice [Surroop 2017], Madagascar [Praene 2017a] et la Réunion [Bénard-Sora 2016], la proportion d'énergies renouvelables aux Comores est presque inexistante. Comme le montre

14. Human Development Index

la Figure 5.5, les Comores est très en retard par rapport à d'autres îles de la zone, le GWP¹⁵ de son mix est 930g CO_{2,eq}/kWh. L'accès à l'électricité est problématique dans la plupart

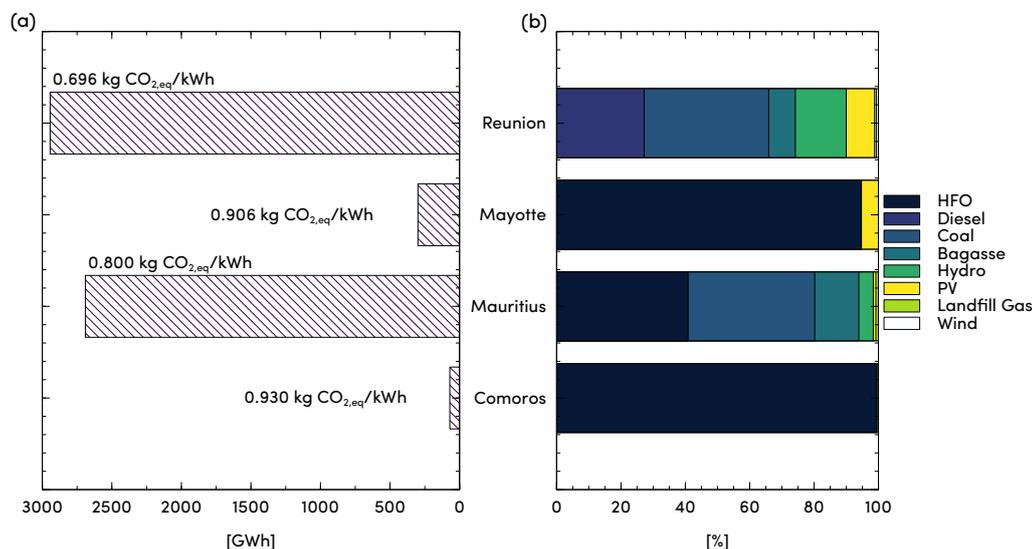


FIGURE 5.5 – Comparaison du mix électrique des îles de l'Océan Indien : a) GWP et électricité produite, b) Production par sources.

des régions de l'Union des Comores et représente un obstacle important au développement socioéconomique. Selon la DGME¹⁶, en 2016, l'accès à l'électricité était de 48,50%. Ce taux, qui représente la situation réelle sur le terrain, est radicalement différent du taux de 77,8% indiqué par les données ouvertes de la Banque mondiale en 2016 [The World Bank 2017]. De plus, il existe une disparité considérable dans l'accès à l'électricité entre Mwali (10%), Ngazidja (60%) et Ndzuwani (50%). Cette différence est particulièrement notable, car les pannes peuvent durer de 2 à 6 heures dans les zones urbaines à 12 heures dans les zones rurales. Une grande partie de l'équipement existant est composée d'installations vieillissantes, dont certaines sont hors service. Les pertes de transmission et de distribution atteignent 48%, représentent une source majeure d'inefficacité dans le système électrique. La capacité disponible est passée de 25 MW en 2013 à 21,5 MW en 2016. La production effective est très faible selon que la moitié des installations de générateurs au diesel sont en service ou non. Malheureusement, les problèmes mentionnés ci-dessus sont beaucoup plus profonds. En effet, les entreprises publiques souffrent de problèmes de gouvernance opérationnelle et financière, qui sont dus à un manque d'investissements et à de fréquentes pertes commerciales et techniques. Les subventions qui sont attribuées à ces entreprises représentent 10% du budget de l'État. Le prix de l'électricité aux Comores est parmi les plus élevés d'Afrique. Le coût de production de l'électricité est d'environ 595 USD/MWh et le prix de vente au consommateur est de 298 USD/MWh. Malgré le coût élevé de l'énergie, la population est prête à payer pour

15. Global Warming Potential

16. Direction Générale de l'énergie, des Mines et de l'Eau

l'accès à l'électricité. Dans le même temps, il est devenu de plus en plus fréquent que des particuliers contournent illégalement les compteurs électriques pour obtenir l'accès au réseau électrique. Finalement, comme nous l'avons dit, les EnRs restent à développer sur ce territoire. Les difficultés auxquelles fait face l'archipel s'apparentent beaucoup au cas de Madagascar. Nous allons voir les principaux gisements et le cadre politique entourant les Comores.

5.1.5.2 Comment traduire l'ambition de transition énergétique ?

Les Comores depuis de nombreuses années affichent l'ambition politique d'opérer une transition énergétique. On retrouve ainsi dans certaines archives de discours politiques l'évocation des ressources renouvelables dès 1987. Ce discours est renforcé à partir des années 90 dans le cadre d'échanges et de coopération sous l'égide de la Commission de l'Océan Indien (COI). Ainsi, le développement des EnRs est quasi inexistant. Le photovoltaïque fait une timide arrivée sur le marché. On trouve quelques rares exemples d'installations individuelles autonomes. Très récemment, une entreprise française a signé un contrat avec la SONELEC pour acheter de l'électricité produite à partir de l'énergie solaire pendant 26 ans. Avec ce contrat, la construction d'un parc solaire de 3 MW, [de France 2020] situé dans la ville de Foubouni, au sud-est de Ngazidja, peut commencer. Ce parc contribuera à une augmentation de 13,5% de la production globale d'électricité de l'Union des Comores. À Anjouan, une centrale solaire de 3,15 MW est actuellement en construction à Pomoni par Engie, [Al-Watwan 2020], couvrant environ 85% de la demande quotidienne. Un second projet de même ampleur est prévu sur la même île dans les deux prochaines années, permettant de couvrir l'ensemble des besoins actuels de la population. Le projet Energie de la COI a stimulé le développement du secteur solaire. La COI a mis en place un plan de soutien pour le déploiement des énergies renouvelables dans les îles de l'océan Indien. L'exemple du PV illustre bien la nécessité de financement externe au pays pour envisager l'émergence des EnRs. Grâce au volcan le Karthala, il existe un potentiel de plus de 30 à 50 MW pour la géothermie selon une étude effectuée en 2015, mais le coût de l'installation demeurerait un obstacle. Comme nous l'avons vu pour le cas de Madagascar la géothermie est l'une des rares exceptions où le coût de l'énergie a augmenté en 10 ans. En 2019, Le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) a entrepris une étude pour l'étude du montage financier qui permettrait de construction d'une installation en 6 ans. Historiquement, deux éoliennes ont été installées sur Ngazidja en 1987. Ces installations étaient utilisées pour alimenter des systèmes de pompage souterrains. Cependant, le volume d'eau prévu n'a pas été atteint. Par conséquent, les tests n'ont pas été concluants. Seule une étude théorique récente menée par le gouvernement a suggéré l'allocation de terres pour le développement de parcs éoliens. La valeur annuelle moyenne de la vitesse du vent est très faible (rarement supérieure à 3 m/s). De plus, selon la carte proposée par l'Atlas mondial des vents [Bank 2019a], les Comores ont une densité de puissance éolienne relativement faible, principalement répartie entre 80 et 270 W/m². Ce faible potentiel est également dû à la faible variabilité de la topographie des trois îles de l'archipel. Comme le montre la figure 5.6, les profils de vent des trois îles sont très différents, et la densité de puissance moyenne pour les 10% des zones les plus venteuses est de 173 W/m² avec une vitesse moyenne du vent de 1,81 m/s, ce qui est inférieure à celle d'autres zones de la région comme l'île Maurice (471 W/m² et 8 m/s, respectivement)

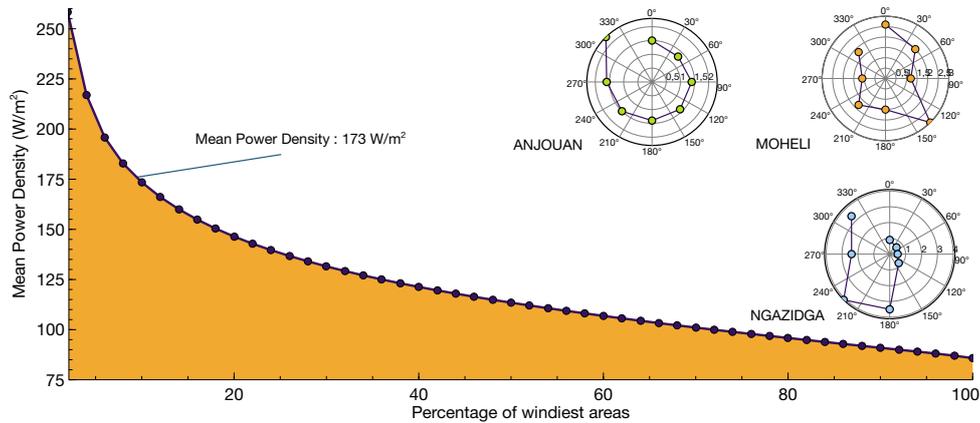


FIGURE 5.6 – Profil du vent sur l'archipel des Comores.

[Surroop 2017, Bundhoo 2018]. Ainsi, l'énergie éolienne devrait être une ressource auxiliaire et non un investissement prioritaire pour la diversification du mix électrique comorien. Pour l'état des lieux des centrales hydroélectriques, les premières installations remontent à la période coloniale française, en 1930. Cependant, la plupart des infrastructures ont été installées entre les années 1970 et 1980. L'absence d'entretiens réguliers a entraîné une détérioration accélérée des infrastructures. Cela explique l'épuisement progressif de l'hydroélectricité dans le mix électrique. L'archipel dispose d'un potentiel hydroélectrique sous-exploité, notamment sur les îles d'Anjouan et de Mohéli. D'un point de vue topologique et hydrologique, ces deux îles présentent un potentiel plus intéressant. Nous avons estimé la production d'énergie en fonction de l'Eq. 5.1.

$$E_{gen} = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot H_{net} \cdot q_v \quad (5.1)$$

où η est le rendement hydraulique (-), ρ est la densité de l'eau (kg/m^3), g est l'accélération due à la gravité (m/s^2), H_{net} est la hauteur de chute nette disponible à la turbine (m) et q_v est le débit d'eau (m^3/s .)

Les résultats de l'évaluation des quatre sites potentiels sont détaillés dans le tableau 5.2. Comme on peut le voir, Anjouan a le plus fort potentiel pour les Comores. Ainsi, sur la base de la consommation moyenne d'énergie, ces installations pourraient répondre à la demande d'électricité de plus de 32 500 ménages. Le financement de ces installations se fait actuellement dans le cadre du projet PASEC¹⁷ financé par le Groupe de la Banque africaine de développement. Le montant total investi s'élève à plus de 5,7 millions d'euros. Ainsi comme on peut le voir l'archipel montre un potentiel différent en fonction des îles. Toutefois, de façon analogue à Madagascar, la vétusté des infrastructures et du réseau ne permet pas une sécurité énergétique suffisante à un développement économique du territoire. Actuellement, il n'existe pas de politiques spécifiques qui inciteraient au développement des EnRs. Cela s'explique par trois difficultés principales. Premièrement, la situation économique actuelle du pays est alarmante. En effet, le pays souffre de vulnérabilités structurelles, et la situation

17. Comoros Energy Sector Support Project

TABLE 5.2 – Hydropower potential in Anjouan an Moheli islands.

	Anjouan			Moheli
	Marahani	Lingoni	Tatinga	Miringoni
η			0,6	
H_{net}	30,9	32,8	19,7	17,5
q_v	1,4	0,8	1,2	0,1
Power (kW)	254,6	154,4	139,1	10,3
Egen (GWh)	2,231	1,353	1,219	0,090

économique reste fragile, limitant ainsi la capacité du territoire à investir dans son développement. Deuxièmement, l'instabilité politique récurrente entrave l'investissement de capitaux étrangers et la durabilité de l'orientation politique stratégique, notamment dans le secteur de l'énergie. Troisièmement, la définition d'une feuille de route pour le secteur de l'énergie nécessite des données statistiques précises sur le territoire qui ne sont actuellement pas disponibles. Compte tenu de tous ces handicaps, le gouvernement comorien a organisé sa première conférence nationale sur l'énergie en juin 2017 [Comores 2017]. Le gouvernement a affirmé sa volonté de sortir le pays de sa situation énergétique précaire. L'objectif est de mobiliser les acteurs de l'énergie sur sa vision stratégique à moyen terme appelée "Comores Horizon 2030".

Jusqu'à présent, le principal problème a été de répondre à l'urgence de la demande d'électricité en utilisant des centrales à combustibles fossiles. La mise en œuvre d'une véritable politique énergétique est cruciale pour jeter les bases d'une planification énergétique à long terme. Néanmoins, aucun cadre réglementaire ne régit le secteur de l'énergie. Il est donc essentiel de créer une incitation et un cadre juridique attrayant. Ce cadre est particulièrement important pour les investisseurs en raison de l'importance des coûts initiaux. Comme l'explique [Surroop 2018b], un problème persistant parmi les PEID est le manque de volonté politique à s'engager dans un changement radical. À court terme, l'émergence d'un véritable programme politique combiné à la restructuration du secteur de l'électricité constituerait les premiers pas vers une société décarbonée. Il semble également crucial de mettre en place un environnement réglementaire indépendant qui pourrait évaluer librement le niveau des choix politiques et des investissements afin de définir si les objectifs définis sont atteints.

Une des pistes les plus prometteuses peu encore explorées concerne la biomasse à travers la méthanisation ou la gazéification. En effet la gestion est une problématique de plus en plus importante aux Comores. En effet, il n'existe pas aujourd'hui de véritable circuit de collecte de ces déchets. La pression environnementale induite par ces quantités de déchets non traités devient plus en plus dramatique sur l'archipel. Au-delà de cet état de fait, les OMRs représentent un grand potentiel de production d'énergie qui contribuerait à la diminution de la vulnérabilité énergétique du territoire. Des travaux de thèse sont actuellement au sein de notre laboratoire afin d'évaluer précisément le potentiel que représentent ces déchets. L'objectif est ainsi d'évaluer si chacune des îles présente un potentiel suffisamment pour y envisager l'introduction de petites unités de production énergétique ou s'il serait plus judi-

cieux de centraliser sur la Grande Comores l'ensemble des déchets pour produire là où le besoin est le plus important.

5.1.6 Conclusion

Les espaces insulaires sont des terres de paradoxe dans la problématique de la transition énergétique et du changement climatique. Dans les zones tropicales, les îles subissent de nombreux aléas climatiques et sont donc au premier rang des effets du changement mondial. Pour autant, au-delà de faire reconnaître leur territoire comme vulnérable, de nombreuses îles de par le monde se sont engagées dans une démarche volontariste de quitter une dépendance presque totale aux combustibles fossiles. Si l'on considère le seul cas de l'énergie, les émissions totales de CO₂ sont marginales vis-à-vis du reste des pays. Cependant, leur forte dépendance aux ressources fossiles induit une intensité énergétique très carbonée. Finalement, ce paradoxe se poursuit dans les discours, lorsque l'on positionne les territoires insulaires comme de véritables laboratoires à échelle réelle d'expérimentation technologique et de stratégie énergétique. En effet, leur taille permet rapidement de mesurer (*à condition que la mesure soit effectuée*), les conséquences des stratégies énergétiques et/ ou de les optimiser le cas échéant.

Le choix des trois îles que j'ai présenté n'est pas anodin. Ces trois exemples illustrent bien la disparité typologique des îles qu'il peut exister de par le monde. Toutefois les barrières au déploiement des Enrs demeurent toujours très proches quelque soit les îles. Bien que la Réunion ait été précurseur dans l'appropriation de ces enjeux, via la volonté depuis 2001 de Paul Vergès, l'objectif dépassait déjà les frontières réunionnaises. L'idée inhérente à cette ambition politique d'autonomie énergétique est la réalisation d'expérimentation et d'expertise de l'Indianocéanie¹⁸ sur les enjeux du changement climatique en milieux insulaires. Il apparaît dès lors évident que le premier levier d'une transition énergétique reste les acteurs de l'énergie, en particulier les politiques. Dans le cas de la Réunion cette volonté a existé et resté palpable jusqu'en 2009. Mais depuis un peu plus de 10 ans, la question d'une autonomie énergétique ne semble montrer de signes encourageant remarquables. Finalement, le cas des trois îles la rhétorique du changement climatique est bien approprié par les politiques, mais ne traduit pas suffisamment par de l'action.

Ainsi, les Comores, comme de nombreuses petites îles, doivent abandonner leur gouvernance énergétique monolithique. Cette approche a montré depuis de nombreuses années une lourdeur structurelle. Son territoire doit s'adapter rapidement pour faire face aux défis de la transition. La vulnérabilité énergétique des Comores est triple. D'une part, le coût élevé (0,24€/kWh) de l'électricité très carbonée est dû à un réseau de distribution peu performant. Cet état dégradé entraîne plus de 40% des pertes. Ce coût est actuellement le plus élevé de la région. D'autre part, cette forte dépendance aux ressources fossiles rend l'archipel sensible à la volatilité des prix sur les marchés mondiaux. Enfin, le gouvernement finance plus de 65% de la production d'électricité. Ce soutien est un obstacle au développement durable

18. Le projet NET-BIOME (NETworking tropical and subtropical Biodiversity research in Outer-Most regions and territories of Europe in support of sustainable development) en est un parfait exemple de cette coopération transnationale.

du territoire. En effet, d'autres questions cruciales, telles que l'accès à l'eau potable ou la santé maternelle et infantile, ne peuvent être soutenues de manière adéquate en raison des ressources liées au secteur de l'énergie.

Le cas de Madagascar peut sembler plus singulier et différent des enjeux des petits espaces insulaires. En effet, avec une surface proche de celle de la France, Madagascar ne dispose pas d'un réseau électrique étendu à l'ensemble de son territoire. De plus sa population, essentiellement rurale, n'est pas répartie de façon homogène sur la grande île. Ainsi la question de la transition peut s'aborder de façon analogue à celle des îles, car les territoires sont non interconnectés. Une approche cohérente des EnRs est nécessaire et cruciale pour l'avenir de Madagascar. En fait, le pays doit faire face à deux défis en même temps. Le premier est d'augmenter de manière significative sa production d'électricité en raison d'une croissance importante de la population et du taux d'électrification. Le second est de définir et d'adopter une stratégie de décarbonation de l'énergie électrique. Ces deux défis sont particulièrement importants à Madagascar en raison de son faible niveau de vie. Ainsi, le gouvernement ne semble pas avoir fait de la définition et de l'adoption d'une planification énergétique durable une priorité. Nous aborderons dans le chapitre de scénarios, les tendances possibles que pourraient prendre le pays afin de réussir sa transition.

Finalement, Madagascar devra réussir dans un premier temps à contenir l'intensité énergétique des ménages afin d'éviter une croissance trop importante de la demande en électricité. L'autre aspect sera de garantir l'approvisionnement en électricité verte. L'obstacle le plus évident au déploiement des énergies renouvelables est principalement la situation économique et la structure de l'île. En effet, 70% de la population vit encore sous le seuil de pauvreté avec moins de 2 dollars par jour. Il semble donc évident que seule une politique de développement volontariste de la part du gouvernement pourrait réellement mettre le pays sur la voie du changement. La première étape consisterait à définir une nouvelle politique qui pourrait faciliter la mise en œuvre de ces technologies renouvelables à Madagascar. L'étape suivante, qui fait souvent défaut, consiste à transformer les discours politiques en actions concrètes sur le terrain. Dans les années à venir, une contribution significative sera d'établir une feuille de route énergétique, qui définit chaque phase à franchir pour réussir sa transition énergétique. Une fois qu'un environnement de développement stable et intégré pour la production régionale est atteint, une interconnexion entre les sous-territoires pourrait être envisagée.

Finalement, cette étape de diagnostic des potentialités et des barrières au déploiement des EnRs, montre bien l'urgence de l'action. La différence majeure entre les territoires vient de l'ingénierie financière mobilisable sur chacune d'entre elles. L'aspect économique est d'autant plus crucial que certaines îles (Madagascar et Comores) du fait de contrainte socio-économique très forte peinent à s'intéresser réellement à ces questions de la transition énergétique, car elles sont inscrites comme un challenge du futur et non un enjeu du quotidien. Le soutien financier extérieur est indispensable à cet engagement crucial. Plusieurs îles de l'océan Indien ont inscrit à leur agenda la date 2030 comme une date clé. Comme le souligne [Milot 2019a], s'intéresser uniquement aux objectifs finaux se rapproche plus d'une révolution énergétique qu'à une transition. Les changements structurels anticipés et donc progressifs sont l'essence même de la notion de transition, qui

permet une adaptation sociétale en douceur et non une rupture due à un changement radical.

VALORISATION – 4 articles en revue dont 1 en évaluation, 5 communications. Les travaux menés ont reçus le financement de trois projets : TRANSEETER (Université de la Réunion) , EBENE(AUF) et FESTII (EUROPE). Nous avons ainsi développé des collaborations avec les universitaires des pays partenaires .

ENCADREMENT – J’ai encadré une thèse INTERREG, Vanessa Rakotoson à l’université de la Réunion - Participé aux travaux de thèses de Mamy Harimisa Radanielina de l’Université d’Antananarivo. Cette partie de diagnostic a nécessité l’appui de 3 stages de Master 2

FORMATION – Une UE Diagnostic du territoire en Master 1 VEU et 1 UE Energies renouvelables ont été mise en place conjointement à ces travaux.

De l'exploration des données pour analyser les territoires

Sommaire

6.1	L'analyse exploratoire de données	95
6.2	Les outils et méthodes	96
6.2.1	L'analyse en composantes principales (ACP)	96
6.2.2	Le "Clustering" ou classification non supervisée	97
6.2.3	Système d'information géographique	98
6.3	L'ACP pour identifier les disparités	99
6.4	Optimisation spatiale par clustering	101
6.5	SIG et Analyse de données	105
6.6	Indicateurs composites	108
6.6.1	Transition dans les PEID	110
6.6.2	Durabilités des pays de l'UE	112
6.7	Synthèse	114

COMME nous l'avons dit dans le chapitre précédent, la transition énergétique n'est pas un objet de recherche d'une discipline unique. Compte tenu de la variété des acteurs, des champs de connaissances, des outils et méthodes, elle appelle nécessairement à la transdisciplinarité [Raymond 2017]. Ainsi, sa finalité est l'analyse et la compréhension du *monde présent*, selon [Nicolescu 1996]. Cette compréhension de notre environnement est ce qui nous permet dès lors de poser les jalons d'une lecture prospective du territoire. Comme nous allons le voir dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'analyse de données à la fois spatiales et/ou temporelles afin de comprendre les dynamiques en cours.

6.1 L'analyse exploratoire de données

La transdisciplinarité est productrice de données variées pas toujours quantitatives qui doivent être rassemblées et interprétées. Or, ces nombreux ensembles de données multi-variées ne peuvent être projetés facilement d'un point de vue graphique. Si on considère

un système à plusieurs variables, on sait se représenter aisément une fonction du type $u = f(x, y, z, t)$ où t désigne le temps, et (x, y, z) sont des coordonnées du système S dans l'espace par exemple. Au-delà, de ces trois dimensions et de celle du temps, cela s'avère plus complexe à visualiser. Cette question du trop grand nombre de variables a été nommée par [Bellman 1961] est connue sous le nom de "curse of dimensionality".

Ainsi les outils tels que l'analyse en composantes principales, la classification non supervisée (*Clustering*) ou encore le SIG s'avèrent particulièrement intéressants pour nos analyses. Avant de poursuivre sur les méthodes utilisées, revenons en quelques lignes sur les motivations des recherches dès que nous avons engagé depuis 2015 sur cet axe. Le postulat de départ de notre travail a été de nous intéresser à la question de la transition en milieu insulaire, en commençant par le cas de la Réunion. De nombreuses études existent déjà au sein de notre université sur des champs très divers des énergies renouvelables, de la conception bioclimatique, de la biodiversité, de l'aménagement du territoire, etc. S'agissant de notre spécialité autour de l'énergie et l'environnement, nous n'avons pas trouvé de travaux de recherche permettant de comprendre l'évolution des besoins et potentialités du territoire. Tous les travaux dans le domaine des énergies renouvelables reposaient sur l'objectif de production et d'autonomie électrique, sans pour autant s'interroger sur la nature réelle des dynamiques territoriales de ces demandes et réfléchir à une territorialisation de la production énergétique. Notre choix a donc été de s'intéresser aux données disponibles pour la Réunion, mais également pour différents espaces insulaires et de tenter d'observer si ces espaces amorçaient une certaine transition énergétique, commençaient donc leur chemin vers plus de durabilité. Ainsi je présenterai le cadre méthodologique des outils retenus et présenterai quelques illustrations de nos travaux, pour une mise en perspective de ces développements :

- Analyse des consommations d'électricité ;
- Création d'un indicateur composite de durabilité ;
- L'analyse de données comme outil de zonage climatique.

6.2 Les outils et méthodes

6.2.1 L'analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP est probablement la technique d'analyse statistique multivariée la plus ancienne et la plus utilisée dans de nombreuses disciplines scientifiques. Cette technique est particulièrement intéressante dans l'optique de réduction de la dimensionnalité d'un ensemble de données quantitatives [Wold 1987]. Les premiers travaux et les fondements de l'ACP ont été définis en 1901 par Pearson, [Pearson 1901]. Ce dernier pose ainsi le sens même de l'ACP : *Dans de nombreuses disciplines, il est souhaitable de représenter un système de points dans le plan, dans un espace tridimensionnel ou plus, par la ligne droite ou le plan "le mieux adapté"*. La formalisation moderne telle que nous l'utilisons aujourd'hui dans les outils d'analyse statistique a été faite par [Hotelling 1933].

Considérons un tableau de données de n individus représentés par p variables quantitatives x , L'ACP va nous permettre d'explorer les ressemblances entre individus, mais également

les différentes corrélations qui peuvent exister entre les variables. On cherche donc à définir une représentation des n individus dans un sous-espace F_k de \mathbb{R}^p de dimension $j \ll p$, ce sous-espace étant constitué des composantes principales. Ces composantes sont simplement des combinaisons linéaires des variables d'origine avec des coefficients donnés par le vecteur propre. Une propriété des composantes est que chacune d'entre elles contribue à la variance totale expliquée des variables originales. Ainsi les composantes se trouvent être des combinaisons linéaires des variables $x(i)$, ($i = 1, 2, \dots, n$). Le schéma d'analyse exige que les contributions des composantes se produisent par ordre décroissant de magnitude, de sorte que la plus grande variance de la première composante explique la plus grande variance des variables originales. Pour sélectionner le nombre de composantes à considérer, on utilise un critère visuel, appelé "critère de coude" qui explique une rupture dans les histogrammes du pourcentages de variance "screeplot". Egalement, [Kaiser 1960] a proposé comme critère de ne retenir que les composantes dont la valeur propre respecte la condition : $\lambda_i > 1$. Ce critère est plutôt performant et permet de ne retenir que les composantes expliquant une part significative de la variance totale du jeu de données initiales.

La mise en oeuvre de l'ACP nécessite quelques étapes préalables de préparation des données. La technique consiste à centrer et réduire les données selon l'équation suivante :

$$z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma_X} \quad (6.1)$$

Cette opération permet de rendre comparable les variables entre elles car elles ne sont pas de la même unité et/ou sur les mêmes échelles de valeurs.

6.2.2 Le "Clustering" ou classification non supervisée

Les méthodes de classification et de clustering sont très nombreuses à l'heure actuelle. Le choix de l'utilisation se fait en général en fonction des objectifs, des pratiques associées à la discipline et à la base de données [Jain 1999, Fraley 1998]. Le clustering est une technique non supervisée ce qui veut dire que les regroupements des données se font par similitude ou caractéristiques communes des individus étudiés et non par un critère fixé par l'observateur de l'étude. Ayant travaillé en amont sur l'ACP, nous avons fait le choix d'utiliser la méthode *Hierarchical Clustering on Principal Components (HCPC)*¹.

L'approche HCPC est la combinaison de trois techniques fondamentales utilisées dans l'analyse de données multivariées, à savoir l'analyse de groupement hiérarchique (HCA), la méthode de partitionnement k-means et l'ACP. Cette analyse est une méthode de réduction des dimensions qui permet d'utiliser des variables quantitatives pour explorer et visualiser une matrice composée de données individuelles. L'objectif principal de l'ACP est de maximiser la variance totale des points projetés, c'est-à-dire de définir le sous-espace qui représente le mieux la diversité des individus. L'un des avantages importants de cette méthode est sa capacité à extraire les caractéristiques et à résumer les informations contenues dans un ensemble de données.

1. Classification Hiérarchique sur Composantes Principales

Dans nos travaux, cette première étape, qui peut être considérée comme une étape préliminaire, consiste à augmenter la stabilité de la classification, réduisant ainsi le bruit associé aux données. Après avoir défini le nombre de dimensions (composantes principales) à retenir pour notre analyse, un arbre hiérarchique est construit sans nombre de clusters prédéfinis. La hauteur optimale à laquelle couper le dendrogramme est définie par des méthodes d'optimisation croisée de type Silhouette ou GAP [Tibshirani 2001]. L'optimisation initiale du nombre de clusters a été réalisée le plus souvent en utilisant la méthode GAP, qui fournit une approche statistique au lieu d'une mesure globale telle que la méthode du coude ou de la Silhouette moyenne [Husson 2017]. La méthode compare la variance intragroupe par rapport à un ensemble de données de référence généré. En supposant que la distribution normale représente les données, l'ensemble de données de référence est obtenu par l'échantillonnage de Monte-Carlo. L'indicateur GAP se définit alors par :

$$\text{Gap}_n(k) = E_n^* \{ \log(W_k) \} - \log(W_k) \quad (6.2)$$

Le partitionnement est rendu plus robuste par l'application de la méthode k-means de mise en clusters, dont l'objectif est de mettre en évidence de manière heuristique des groupes d'objets similaires dans un ensemble de données. Notre classification non supervisée est un processus en deux étapes : la première étape est la CAH², qui nous permet de définir la première partition de nos données projetées sur les deux meilleures composantes principales ; ensuite, la méthode k-means, qui est un algorithme basé sur les centroïdes, est utilisé pour consolider la partition.

6.2.3 Système d'information géographique

L'interpolation spatiale consiste à reconstruire les valeurs correspondant à une variable géoréférencée sur un territoire défini à partir d'un nombre donné de points d'échantillonnage. Cette étape est particulièrement intéressante dans un territoire ne disposant pas d'une grille spatiale de données de qualité suffisante ou égale. Le processus d'interpolation est validé par l'hypothèse de la corrélation d'objets distribués de façon spatiale. Plusieurs méthodes d'interpolation sont applicables. La méthodologie proposée utilise la pondération par inversion de distance (IDW), qui est basée sur le principe d'un coefficient de pondération ; en d'autres termes, le calcul de la valeur d'un point est réalisé en faisant la moyenne des valeurs des points situés dans son voisinage, pondérée par l'inverse de la distance de chaque point. En revanche, la pondération en fonction de la distance inverse (RDW) est calculée selon le principe de la première loi de la géographie : les choses proches sont plus liées que les choses plus éloignées. Contrairement à la géostatistique, la méthode déterministe IDW est bien adaptée à l'ensemble des données des études dans le domaine énergétique et présente l'avantage d'être généralement suffisante et appropriée [McCoy 2001, Drouin 2010, Bossier 2012]. Le point de départ est un ensemble de données ponctuelles correspondant aux valeurs du niveau d'agrégation climatique que l'on souhaite. Le but de nos travaux est d'obtenir des estimations spatiales des valeurs des points d'échantillonnage. Nous l'aborderons dans les parties suivantes, cette approche a été utilisée afin de générer une carte de zonage climatique de Madagascar.

2. Classification ascendante hiérarchique

La formulation générique, qui est exprimée selon l'équation Eq. 6.3 [Hou 2017], a été définie par Bartier et Keller [Bartier 1996]. Ainsi, le paramètre de puissance p détermine la valeur la plus appropriée la plus proche du point interpolé. Dans le processus d'interpolation, plusieurs valeurs d'interpolateur (1, 1,5, 1,9, 2, 5, 10 et 20) ont été testées conformément aux exemples de la littérature [de Oliveira Júnior 2019, Li 2014].

$$\mathbf{z}_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \mathbf{d}_{x,y,i}^{-\beta}}{\sum_{i=1}^n \mathbf{d}_{x,y,i}^{-\beta}} \quad (6.3)$$

Où z_i est la valeur de l'échantillon au point i , z_{xy} est le point à estimer et d_{xy} est la distance entre le point de l'échantillon et le point estimé. La variable β appelée valeur de l'exposant améliore la précision de l'interpolateur IDW entre les données mesurées et estimées [Kravchenko 1999].

6.3 L'ACP pour identifier les disparités

Lorsque l'on observe les bases de données mondiales, les statistiques sont à l'échelle nationale. Ces dernières ne traduisent pas forcément les hétérogénéités ou inégalités spatiales existantes sur le territoire. À titre d'exemple, la part d'Enrs dans le mix électrique de la France est 18,5% en 2018. Comme le montre la Figure 6.1 la production d'électricité a peu évolué dans les ZNI françaises. La part d'énergies renouvelables dans le mix électrique de ces territoires

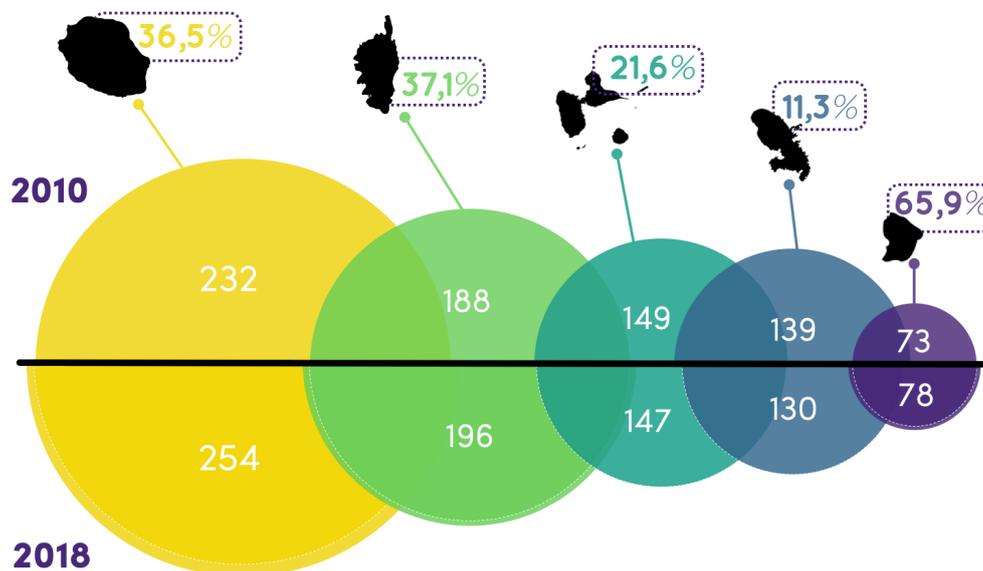


FIGURE 6.1 – Evolution de la production électrique en ktep dans les territoires outre mer français.

varient de 11 à 65%. De fait, les chiffres ne traduisent pas les réalités très différentes existantes sur les territoires d'outre mer. Ainsi, nous nous sommes intéressés dans le cadre de nos travaux à évaluer la qualité environnementale des productions d'électricité. Puis dans

un second temps, nous avons mené une analyse de données afin de voir dans quelle mesure certaines îles pouvaient avoir des caractéristiques similaires.

L'aspect de l'analyse environnementale sera abordé au Chapitre 8. Nous nous intéresserons uniquement à l'usage de l'ACP sur les données des îles. D'après les travaux de [Herbert 2016], il est possible de proposer un premier classement des territoires selon leurs émissions de CO₂ de leur mix, ainsi on obtient :

- France | **Bas** ;
- Guyane, Corse | **Moyen** ;
- Reunion, Guadeloupe, Martinique, Mayotte | **Haut**.

L'ACP que nous avons effectué a été sur le jeu de variables suivantes : population, PIB par habitant, production annuelle d'électricité, part d'Enrs dans le mix, émission total (GWP) pour la production électrique, la surface de l'île et l'indice de situation insulaire (ISI). Une fois la matrice de corrélation calculée, il a été démontré que les critères choisis ne sont pas corrélés, à l'exception de la proportion d'Enrs et la valeur du GWP. La corrélation négative entre ces deux variables s'explique par le fait que les niveaux d'émissions du GWP déclinent avec l'augmentation des Enrs. La superficie est également négativement corrélée au GWP. En effet, si l'île est trop petite, il y a probablement moins d'opportunités à diversifier le mix électrique et d'y introduire plus de ressources propres.

La Figure 6.2 présente une combinaison des projections des individus et des variables.

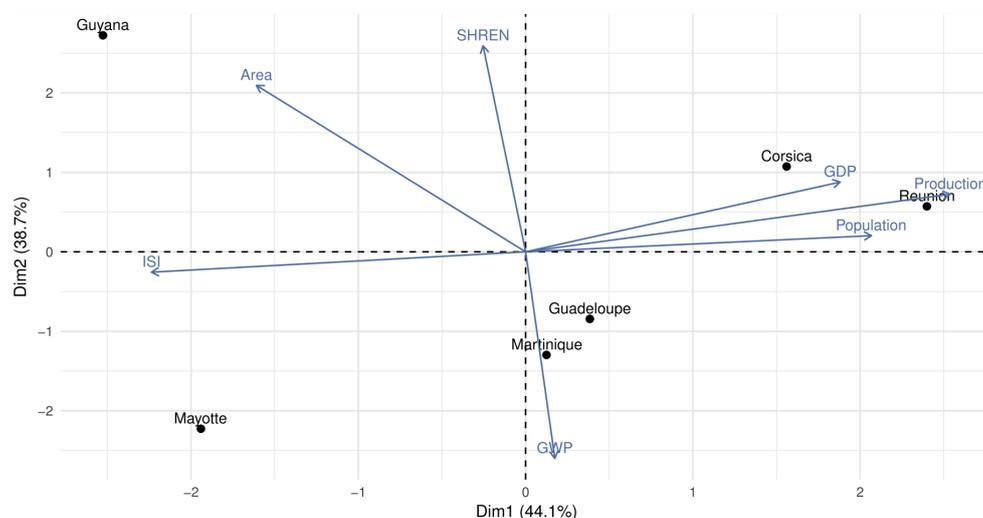


FIGURE 6.2 – Biplot ZNI/Variables sur les deux premières composantes principales.

Compte tenu du plan factoriel, les qualités de projection des individus sont évaluées par la valeur totale du cosinus carré sur les deux axes. Plus la valeur du cosinus carré est élevée, meilleure est la qualité de la projection. La contribution à la construction de l'axe est un autre indicateur de la qualité de la projection. Sur la base des résultats, la contribution à la production d'électricité est la plus élevée pour la dimension 1, suivie par l'ISI. L'émission de GWP et le pourcentage d'Enrs dans le mix contribuent à environ 70% de la dimension 2 dans la carte des facteurs variables. La projection de l'ACP montre des dépendances élevées entre

les variables Production, Population, PIB et ISI. Pour les projections individuelles, la Guyane et Mayotte contribuent fortement à la construction du deuxième axe, à hauteur de 45% et 30% respectivement. La corrélation négative entre les émissions du GWP et la contribution des Enrs est bien représentée dans la Figure 6.2 de la carte factorielle des variables, comme c'est le cas du paramètre ISI et de la production d'électricité. Ces résultats nous permettent d'identifier deux typologies de territoires et deux cas singuliers :

- La Corse et la Réunion sont des îles qui ont une production d'électricité élevée, une population importante et un PIB élevé, et leur mix électrique comprend une proportion relativement élevée d'Enrs (>30%);
- La Guadeloupe et la Martinique correspondent à des îles qui produisent beaucoup d'électricité à partir de combustibles fossiles. Cela pourrait s'expliquer par la petite superficie et l'ISI de ces îles. L'absence de centrales hydroélectriques sur ces deux îles souligne la petite superficie et la variabilité topographique;
- La Guyane est un vaste territoire dont le mix électrique repose essentiellement sur l'hydroélectricité et qui est très isolé;
- Mayotte est une petite île isolée, les faibles variations topologiques expliquent qu'il n'y ait pas d'usage de l'hydroélectricité.

L'ACP a souligné que la production d'électricité et ses modes de production sont des paramètres importants qui contribuent à caractériser l'éloignement d'une île et sa prédisposition à utiliser des combustibles fossiles. Le facteur ISI est également très important pour la compréhension de l'utilisation des combustibles fossiles à la place des Enrs dans le mix électrique.

6.4 Optimisation spatiale par clustering

L'usage peut s'avérer particulièrement intéressant dans divers champs et problématiques. La question de la transition énergétique se couple à une problématique qui est celle des transports à la Réunion. Actuellement, 48% des émissions de GES sont dues au transport. Le manque d'infrastructures dédiées et l'absence de lisibilité font que les transports collectifs ont une image perçue négative auprès de la population. Par conséquent, le véhicule individuel (à passager unique le plus souvent) demeure le mode de déplacement privilégié. Ce secteur apparaît donc comme un des leviers de la transition énergétique régionale. Le défi est double : d'une part faire évoluer les pratiques et d'autre part proposer des solutions plus sobres que la voiture individuelle personnelle. Nous avons participé en 2019, à un projet de mobilité alternative LOTOLA, dont l'ambition est de créer un réseau d'autopartage de véhicules propres alimentés par des bornes de recharge électrique le plus souvent situés en zone d'attractivité et également dans ou à proximité des principales gares routières de l'île pour permettre de renforcer les transports collectifs. Le travail s'est organisé en deux parties. La première s'est intéressée à la localisation des stations de charge selon les contraintes foncières des villes et des gisements d'usagers à une distance de marche "raisonnable" de 500 m. Cette étude du gisement évalué à partir d'une approche par polygones d'isodistance et du bâti résidentiel a permis de produire une première cartographie du potentiel et de proposer la localisation de 26 stations selon la Figure 6.3.

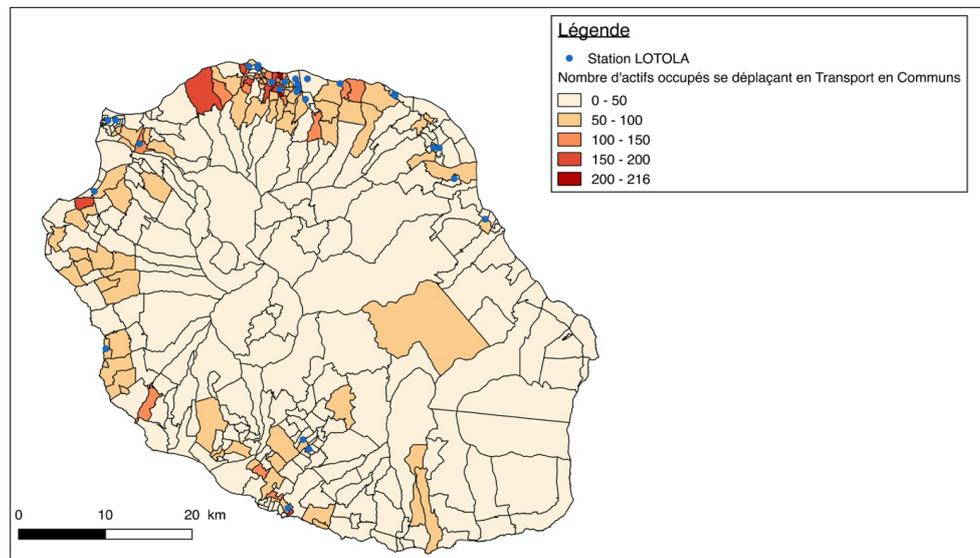


FIGURE 6.3 – Répartition par IRIS du nombre d'actifs occupés se déplaçant en Transport en Communs (données INSEE RGP 2015)

Dans le cadre de ce diagnostic, il nous a semblé opportun de proposer une analyse multivariée sur les données caractérisant les différentes implantations des stations. Nous rappelons tout d'abord que l'objectif général de l'étude était de valider et de proposer un ajustement du positionnement des stations selon la lecture du porteur de projet. De plus, cette optimisation vise bien évidemment une rentabilité économique. De ce fait, il nous semble indispensable de conduire cette analyse de données. Ce travail vient en observation amont de la future performance des stations et des choix opérés dans le cadre de ce projet. Nous avons ainsi souhaité observer selon un certain nombre de paramètres les stations retenues. La section précédente permettait de mettre en évidence la cohérence entre les objectifs annoncés et la localisation des stations. Il est intéressant maintenant d'envisager la performance de ces stations.

L'ensemble de ces stations semblent-elles performantes ou certaines présentent-elles des avantages plus prononcés ?

L'objectif est donc d'identifier :

- Les stations les moins performantes et les plus performantes ;
- Les caractéristiques des stations, afin d'identifier un profil.

Afin de répondre à ces deux objectifs, une ACP est effectuée sur les variables d'analyse. Ces dernières sont résumés dans le Tableau 6.1.

L'analyse du graphique des individus à la Figure 6.4 nous permet d'ores déjà de dégager les grandes des potentialités des stations en fonction de leur localisation. Plusieurs conclusions peuvent être tirées de la lecture de ce plan factoriel :

- Les stations 21 et 22 représentant l'IUT et la gare routière de Saint-Leu sont les stations avec le potentiel de clients le plus faible ainsi qu'une plus grande distance moyenne

TABLE 6.1 – Identification des variables

Code	Dénomination variable	Méthode d'acquisition
bat_res	Surface bâtie de type résidentiel dans le polygone d'isodistance	Création (SIG)
TC	Nombre de clients usagers des transports en communs envisagés	Calculs (SIG, RGP ³ INSEE)
Etud	Nombre de clients étudiants envisagés	Calculs (SIG, RGP INSEE)
Dist_min	Distance de la plus proche station	Création (SIG)
Dist_max	Distance moyenne aux autres stations	Calculs (SIG)
Pop	Population globale dans IRIS touchés	RGP INSEE

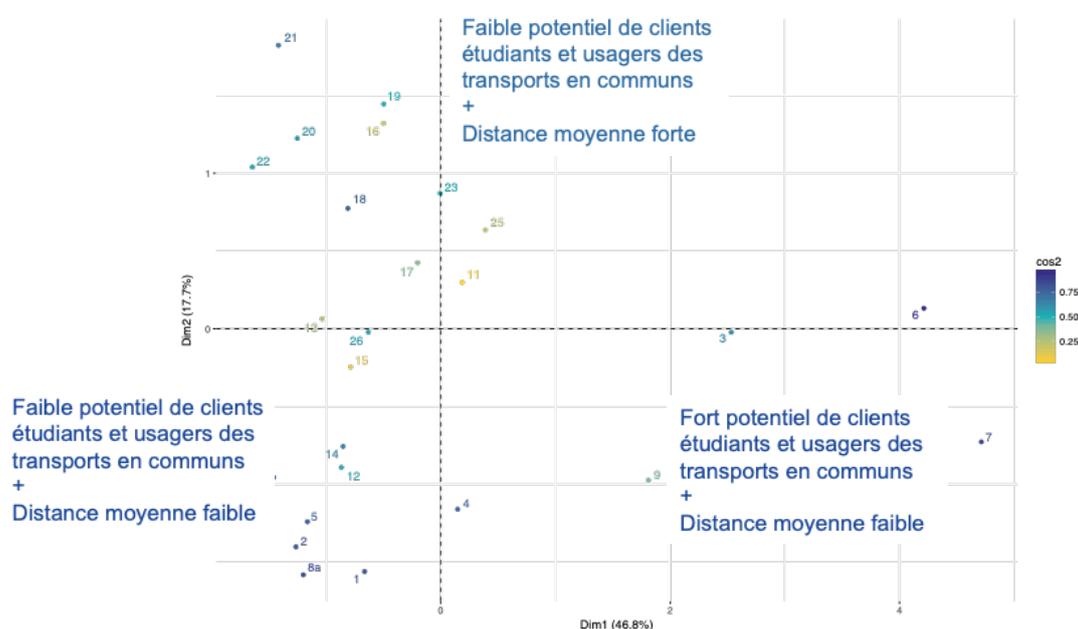


FIGURE 6.4 – Résultats des caractéristiques des 26 stations.

par rapport aux autres stations. Seul dans leur commune, leur faible résultat s'explique par les caractéristiques de leur localisation. La gare routière de Saint-Leu est localisée en centre-ville et la densité résidentielle proche est faible. De même pour la station IUT, localisée dans une zone d'activité, la densité résidentielle y est faible.

- La station 10 représentant la zone aéroportuaire de Gillot, semble également offrir de faibles résultats en termes de potentiels de clients. Cela s'explique par le postulat de départ de l'analyse : on considère en effet le lieu de résidence comme point de départ de l'analyse (pour raison de disponibilités des données). La station de Gillot est typiquement le type de stations qui pourra rayonner par son potentiel d'activités non analysé ici.
- Les stations qui offrent de meilleurs résultats en matière de nombre de clients étudiants et de clients usagers potentiels des transports en commun sont les stations 6 et 7, respectivement Boulevard de l'Océan-Petit marché et Mail du chaudron. Ce sont des zones résidentielles denses. Ces stations sont localisées à Saint-Denis.

- Les stations 3 et 9, localisées à Saint-Denis, ainsi que la station 24, localisée au Port, se démarquent également et offrent de bons résultats sur le plan de nombre de clients potentiels.

Sur la base de ces dernières observations, nous proposons dans la suite de l'analyse un clustering incluant comme variable d'entrée la commune de localisation.

Afin de caractériser au mieux le positionnement des individus sur le graphique, une classification hiérarchique, ci-après appelée clustering, est proposée sur les résultats de l'ACP. Pour le clustering, une variable supplémentaire est ajoutée à l'analyse : la variable commune. Les résultats du clustering mettent en évidence 4 clusters. Toutefois, seuls deux clusters seront à considérer dans l'objectif initial que nous nous sommes fixés dans cette étude. La Figure 6.5 propose une représentation circulaire de la classification. On peut donc visualiser les clusters selon code couleur suivant : Cluster 1 (Gris), Cluster 2 (Jaune), Cluster 3 (Rouge), Cluster 4 (Bleu). L'analyse se fait d'abord selon les modalités que sont les communes. La classe 1 est liée à la modalité « commune de Saint-Denis ». L'analyse montre que 50% des stations de Saint-Denis appartiennent à la classe 1. De plus, l'indicateur de Modalité/Classe nous indique que 83% des stations de cette classe sont de Saint-Denis. Ces deux informations mettent en évidence une surreprésentation de cette commune au sein de la classe 1. Nous reviendrons ci-dessous sur les principales caractéristiques, permettant de définir ce cluster. Concernant la classe 2, cette classe contient 100% des stations de Saint-André et de Sainte-Marie. Ces deux communes représentent à elles seules 2/3 des stations de ce cluster. Les deux derniers clusters ne présentent pas de caractéristiques particulières que l'on puisse retenir. Au final, la discussion sur la caractérisation des clusters porte de façon pertinente sur deux clusters : les clusters 1 et 4.

- Le cluster 1 est représenté par quatre variables : surface de bâti résidentiel, distance moyenne, distance minimum et population. On note en guise de synthèse générale que cette classe prend des valeurs faibles sur l'ensemble des variables ci-dessus, par rapport à l'ensemble de l'échantillon.
- L'autre cluster présentant des informations intéressantes est le cluster 4. Ce dernier est caractérisé par de très fortes valeurs pour le nombre potentiel de clients étudiants, le nombre potentiel de clients usagers des transports en commun, la surface de bâti résidentiel et la population. Le cluster est hétérogène globalement exception faite de la variable surface de bâti résidentiel dont le nombre est très variant selon les stations. Cette remarque concernant la surface de bâti résidentiel est également valable pour le cluster 1.

Le cluster le plus « performant » est le cluster 4 puisqu'il offre de meilleurs résultats en termes de clients potentiels (usagers des transports et commun et étudiants).

Cette analyse nous permet donc de définir les caractéristiques de deux clusters (1 & 4) qui représentent 11 stations. Cette information sera intéressante à terme, afin de voir si, à l'usage, ces stations proposeront une meilleure rentabilité. De ce fait, les déterminants de cette rentabilité seront déjà connus, puisqu'ils auront été en grande partie définis par cette analyse initiale.

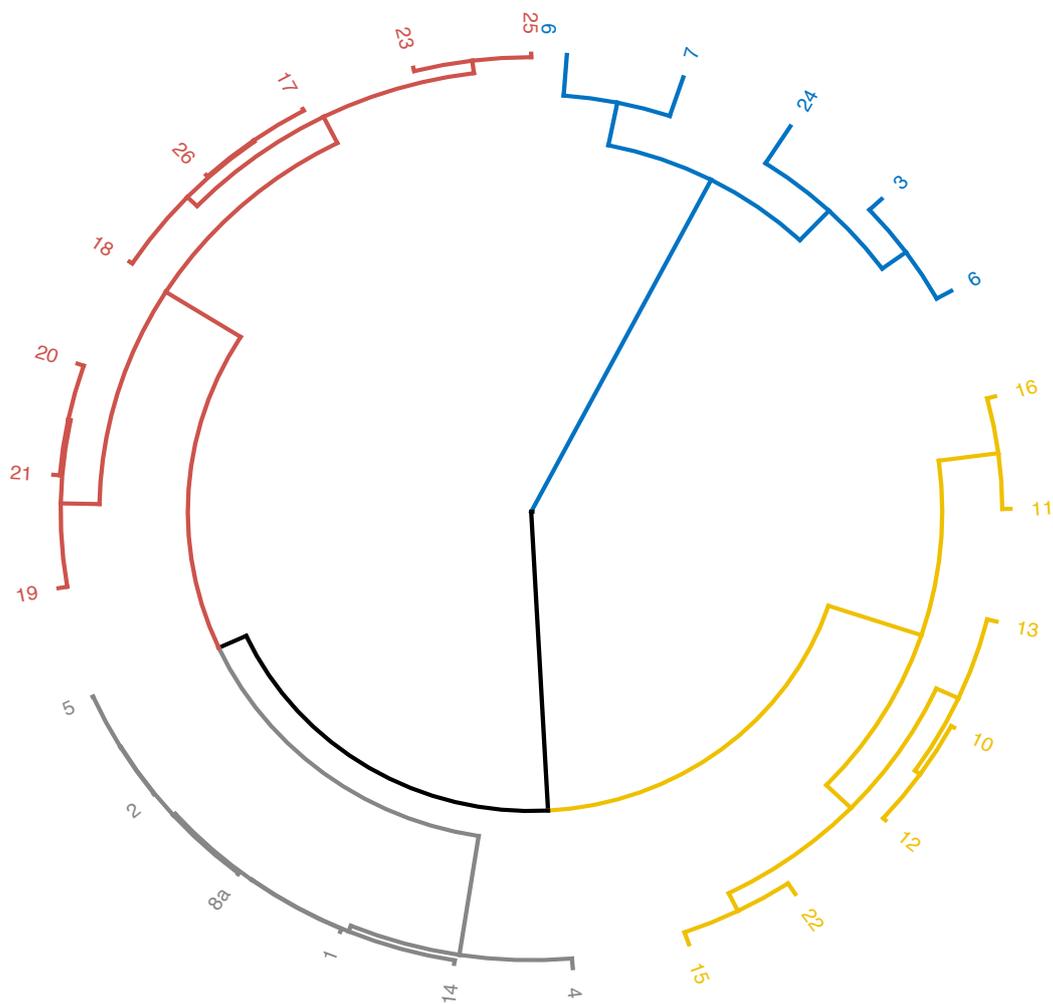


FIGURE 6.5 – Clustering sur les stations de recharge

6.5 SIG et Analyse de données

L'analyse spatiale à partir des outils du SIG couplée à l'analyse exploratoire de données est un support très pertinent dans l'optique de généralisation de l'information à l'échelle d'un territoire. Cela nous renvoie alors aux questions de maillage spatial des informations et de fait à la disponibilité des données originales géolocalisées.

Nous nous sommes intéressés dans le cadre de nos travaux à la question du zonage climatique. En effet, la construction des bâtiments passe de nos jours par des étapes de simulations permettant de tester les architectures et éléments de conception à retenir en fonction des objectifs. Ces environnements de modélisation reposent sur une description précise d'un point de vue structurel des bâtis et données météorologiques en entrée des modèles. Le zonage climatique des territoires est ainsi une condition préalable essentielle pour la conception de

bâtiments sensibles au climat [Walsh 2017a, Mahmoud 2011]. En conséquence, l'importance d'une connaissance précise des conditions climatiques pour la simulation de l'efficacité énergétique d'un bâtiment est largement connue.

La littérature ne fait pas état d'un réel consensus sur une "bonne" ou la meilleure méthode permettant d'effectuer un zonage climatique. L'étude menée par [Walsh 2017b], a montré que la plupart des approches de zonage climatique sont basées sur des méthodes supervisées. Dans ce cas, le postulat de départ est de disposer d'une bonne connaissance des données et du terrain d'étude. On peut alors définir un indice et fixer des seuils qui permettront d'attribuer une classe, et, par conséquent définir un zonage. Nous nous sommes intéressé la formalisation d'une approche méthodologique basée sur le clustering et sur de l'interpolation spatiale. L'objectif étant de permettre la génération de fichiers météorologiques types à partir d'un zonage. Cette approche trouve tout son sens dans la situation de territoire tel que Madagascar, que je présente à titre d'exemple. En effet dans le cas de pays émergents ou en voie de développement, les données météorologiques ne sont pas toujours disponibles. Notre approche offre donc l'opportunité de contourner l'absence d'informations globales en proposant des données météorologiques caractérisant le mieux la zone géographique.

Rappelons rapidement le cadre de l'exercice de zonage climatique. Les zones climatiques peuvent être identifiées de nombreuses façons différentes, en fonction de différents critères :

- soit par des méthodes de **regroupement** (c'est-à-dire en effectuant une analyse statistique par regroupement des observations et en analysant les regroupements possibles ; également appelées "méthodes modernes") [Alrashed 2015] ;
- soit par des méthodes de **classification** (c'est-à-dire en utilisant des seuils pour les variables et les indices climatiques ; également appelées "méthodes traditionnelles").

Le choix de la méthode dépend largement de l'objectif de classification climatique. Parmi les méthodes de classification les plus reconnues, la classification climatique Köppen-Geiger est souvent considérée comme une référence dans le domaine et a soutenu de nombreuses études multidisciplinaires [Almorox 2015, Peel 2007]. L'approche de Köppen-Geiger est reconnue pour ses applications en lien avec la biodiversité, la botanique ou encore les écosystèmes. Toutefois, dans le domaine de l'énergétique les données de rayonnement sont manquantes pour la définition des zones, de fait cela biaise les informations pour une application dans le domaine du bâtiment.

La Figure 6.6 résume la méthodologie générale mise en oeuvre. Dans un premier temps en partant de 47 stations météorologiques, nous avons effectué un clustering et le zonage de Madagascar. Finalement, à partir des fichiers météo types, on effectue des simulations sur des typologies d'habitat caractéristiques de chaque région de Madagascar. Nous avons représenté au sein de la même projection les résultats du clustering sur les composantes principales, voir Figure 6.7. La disposition générale du plan de projection ne semble pas mettre en évidence d'anomalies. La première composante (à droite de l'axe PC1) comprend les régions caractérisées par des températures élevées et une forte irradiation solaire correspondant à des régions côtières. Pour la deuxième composante, la partie supérieure du graphique est caractérisée par des régions qui connaissent des précipitations assez importantes avec une humidité relative élevée et qui sont exposées à des vents forts. La seconde étape de clustering a permis après optimisation par la méthode de GAP, de fixer à

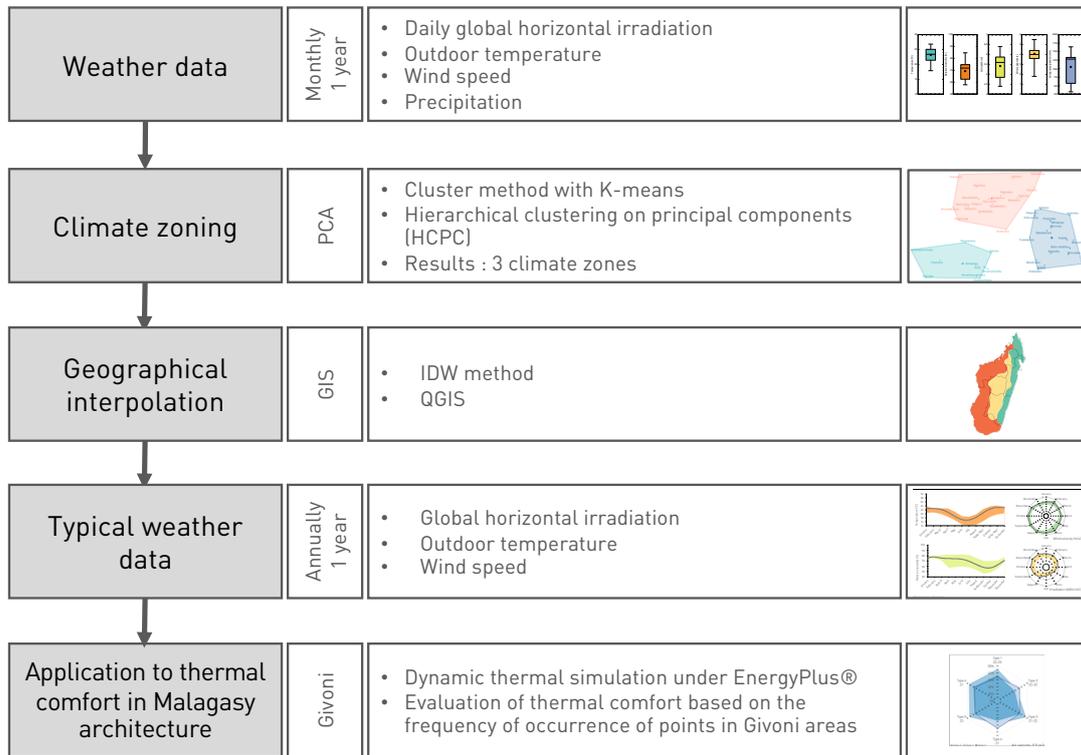


FIGURE 6.6 – Synthèse de la méthodologie générale

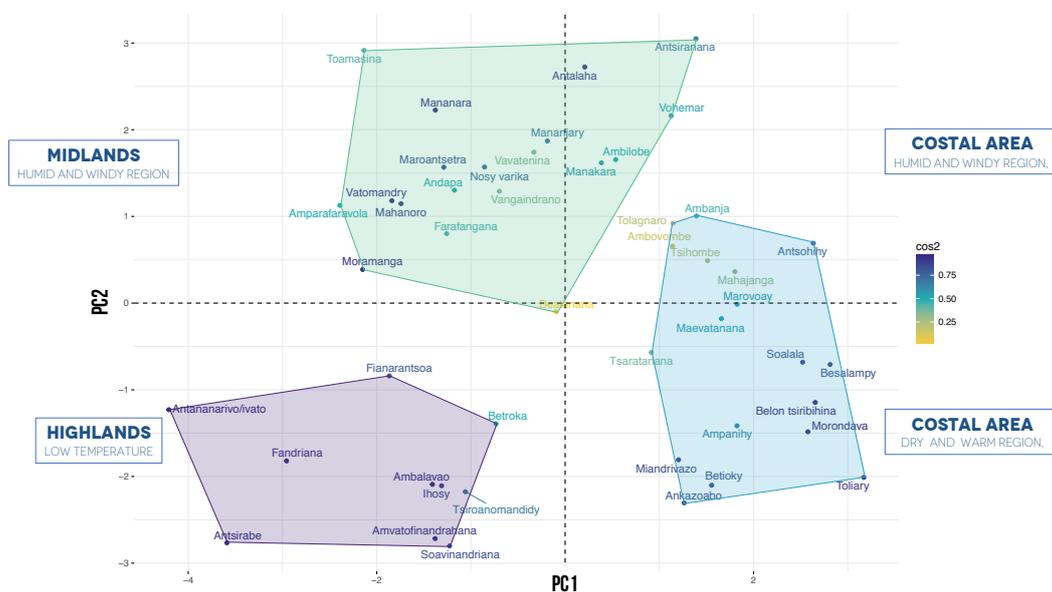


FIGURE 6.7 – Résultats de la HCPC sur les stations météorologiques.

trois le nombre de clusters et par conséquent le nombre de zones climatiques.

Le cluster 1 correspond aux zones d'altitude, caractérisées par les variables de précipitations, de vent et de température. Ces régions sont sujettes à de faibles précipitations par rapport à la moyenne de Madagascar. Les variables qui caractérisent le plus le deuxième groupe sont l'humidité relative et les précipitations. Ce groupe correspond à la région Est. La valeur moyenne de ces deux variables dans le groupe est supérieure à la moyenne générale. Le troisième groupe est principalement décrit par les valeurs les plus élevées pour la température et l'irradiation solaire et la basse altitude. Ce groupe correspond à la zone Ouest de Madagascar avec des conditions climatiques chaudes et sèches. Cette zone est une région sèche, voire aride si l'on considère en particulier le sud de l'île. Ainsi, l'analyse des caractéristiques inhérentes à chaque cluster ont permis de mettre en évidence trois zones climatiques très différentes, respectivement d'ouest en est : une zone sèche, des hauts plateaux et une zone humide et humide, voir Figure 6.8. Le clustering n'est pas seulement interprété en fonction de variables, mais aussi en fonction d'individus. En effet, il convient de rappeler que l'objectif de cette étude est une application de la classification dans le domaine du confort thermique dans le cas spécifique de l'habitat traditionnel. Madagascar, comme beaucoup de pays en développement, ne dispose pas toujours de données météorologiques pour l'ensemble de son territoire. Le deuxième résultat du regroupement est l'identification des parangons. Pour chaque groupe, l'individu dont les coordonnées sont les plus proches du barycentre est appelé le parangon. Le profil de cet individu caractérise alors au mieux le groupe auquel il appartient. Les parangons sont *Ambalavao* (Groupe 1), *Mananara* (groupe 2), et *Belon'i Tsi-rihina* (groupe 3). Ces parangons sont un résultat significatif, car ils permettent de définir des fichiers météorologiques typiques pour chaque zone. Les résultats de zonage climatique obtenus dans le cas de Madagascar demeurent cohérents avec ceux proposés précédemment par les travaux de [Rakoto-Joseph 2009, Attia 2019], toutefois dans les précédents cas, les approches étaient légèrement différentes. Dans le cas de de Rakoto-Joseph, le zonage s'est effectué par une approche graphique qui supposait les calques de la distribution spatiale du rayonnement, vitesse de vent, température d'air etc... Bien que la méthode soit correcte, la difficulté principale est dans la délimitation des frontières. Dans le cas de Attia, l'idée générale était de fixer des seuils pour créer des zones. Cette approche supervisée apporte un biais du fait de la définition des seuils et par conséquent de la limite des zones.

6.6 Indicateurs composites

L'usage des indicateurs composites (IC) est aujourd'hui très répandu dans de nombreux champs (économie, environnement, sécurité, énergie, etc...). A l'heure où les débats s'accroissent sur les effets du changement climatique et que des stratégies politiques doivent se dessiner, le recours à ce type d'indicateur est de plus en plus courant. En effet, ces derniers permettent de synthétiser rapidement un plus grand nombre d'information [Singh 2009]. Leur construction introduit naturellement une incertitude dès le départ car l'on se doit de faire des choix :

- sélection des données ;
- précision des données ;

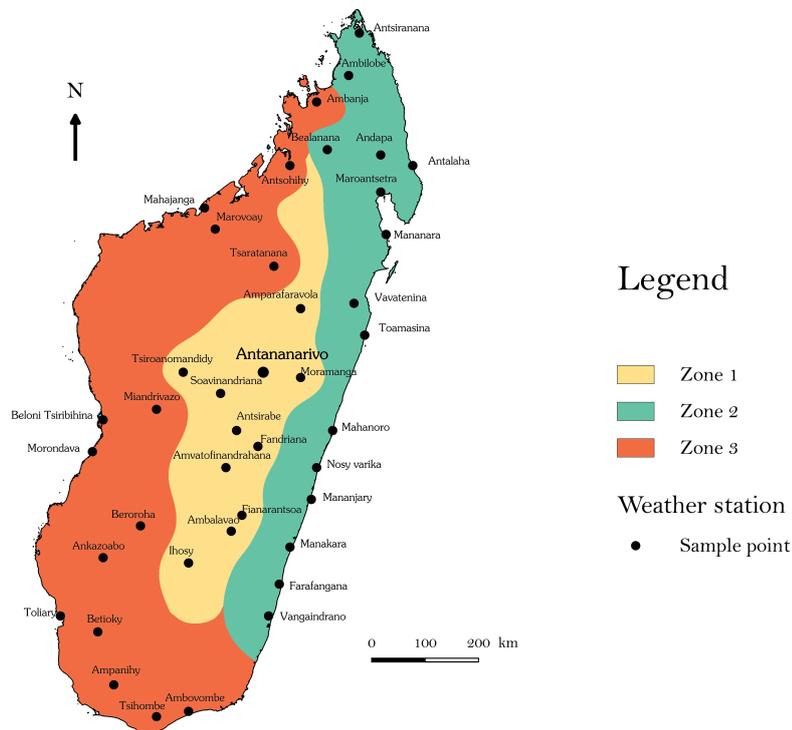


FIGURE 6.8 – Résultats du zonage climatique de Madagascar.

- méthode de normalisation ;
- valeurs des poids ;
- méthode d'agrégation.

Les IC constituent une approche innovante dans les enjeux de durabilité, car ils permettent d'attirer l'attention et souvent, pour diminuer la complexité des problèmes. À titre d'exemple l'un des indicateurs les plus connus est le *Human Development Index (HDI)* [Anand 1994, Stanton 2007], qui est un indicateur de développement et non de durabilité, intégrant des informations sur le PIB/habitant, l'espérance de vie et le niveau d'éducation. Bien que critiqué par de nombreux auteurs, le HDI est par exemple utilisé pour le classement des pays dans des niveaux de développement. On peut ainsi se permettre d'évaluer plusieurs aspects d'un problème et le synthétiser en un seul indice comparable [Atkinson 1997].

Nous avons positionné notre travail sous l'angle de la mesure de vulnérabilité énergétique ou de la durabilité des territoires. Notre méthodologie repose sur une construction des indicateurs en deux étapes. On utilise la propriété selon les composantes principales selon lesquelles ces composantes principales sont combinaisons linéaires des variables originales. L'étape d'ACP nous permet d'agir à la manière d'une analyse de sensibilité, qui permettrait de sélectionner les variables expliquant une part significative de la variance totale contenue dans le jeu de données. Puis dans un second temps, l'IC est construit selon un modèle défini. Nous allons illustrer deux exemples de mise en oeuvre de ces indicateurs.

6.6.1 Transition dans les PEID

Cette étude a été menée sur un échantillon de 35 îles. Pour plus de commodité, dans les résultats des graphiques, les îles sont représentées par leur code alpha ISO. Le premier ensemble de données était initialement basé sur les 57 îles. L'objectif de l'étude est de définir un indice facile à utiliser qui sera défini avec des variables accessibles. Les principales composantes (Dim) sont des macro-facteurs basés sur une combinaison linéaire de l'ensemble des variables, définis comme suit :

$$Dim_i = \sum_j \alpha_{ij} X_j \quad (6.4)$$

où α_{ij} est la contribution de la variable exogène X_j à la construction de la composante principale i . Ces dimensions sont non corrélées et orthogonales. L'ACP est également une méthode fréquemment utilisée comme modèle régressif [Romano 2016] : c'est en fait une bonne méthode statistique pour analyser les relations de plusieurs variables entre elles. De nombreuses recherches ont porté sur la définition d'un indice basé sur l'ACP, [Gupta 2008, Gnansounou 2008]. Notre étude vise à définir un indice composite de durabilité (SI), et le modèle décrit à partir des composantes principales est défini comme suit :

$$SI = 1 - \frac{\lambda_1 Dim_1 + \lambda_2 Dim_2 + \dots + \lambda_j Dim_j}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_j} \quad (6.5)$$

On peut clairement noter que la plupart des îles (23 sur 35) sont devenues plus vulnérables au cours de la période (2010-2014). Ces dynamiques relatives sont particulièrement observables pour les Tonga, les Seychelles, les Maldives et Saint-Christophe-et-Nevis, car leur diminution de la durabilité est la plus importante. Ces îles ont connu une augmentation de leur population urbaine et, simultanément, une diminution de leur PIB. Leur vulnérabilité est principalement due à leur dépendance importante à la consommation de combustibles fossiles pour la production d'électricité, car aucune source d'énergie renouvelable n'a été développée. Quatre cas (Singapour, Cuba, Dominique et Bahreïn) sont également singuliers, avec l'indice de durabilité le plus bas. Ces cas sont caractérisés par une consommation d'électricité très élevée par rapport aux autres îles, avec une intégration faible ou nulle des énergies renouvelables. Ces îles ont des économies à croissance rapide qui ont induit le déploiement d'une forte intensité énergétique dans les territoires. Pour l'année observée, Singapour était encore le pays le moins durable, et la situation continue à se détériorer. Ainsi, la variation globale de la durabilité des îles est hétérogène, avec une variation moyenne de $0,059 \pm 0,061$. Ces résultats mettent en évidence la disparité de ces territoires et la difficulté de définir un plan commun de durabilité pour l'avenir. En se concentrant sur le cluster, on observe qu'entre 2010 et 2014, le cluster 1 est devenu plus vulnérable. La raison sous-jacente est la croissance de deux variables corrélées (population et consommation d'électricité) pour la plupart des îles de ce cluster. En même temps, le cluster 2 comprend des îles qui ont accru leur durabilité, même si elles ont mis en route une nouvelle dynamique basée sur l'économie et le développement de l'électricité verte. Enfin, le cluster 3, qui comprend Cuba et la Dominique, a développé des centrales hydroélectriques et d'autres SER (*pour Cuba*). Toutefois, ces îles affichent de faibles performances en matière de durabilité en raison de la croissance de leur

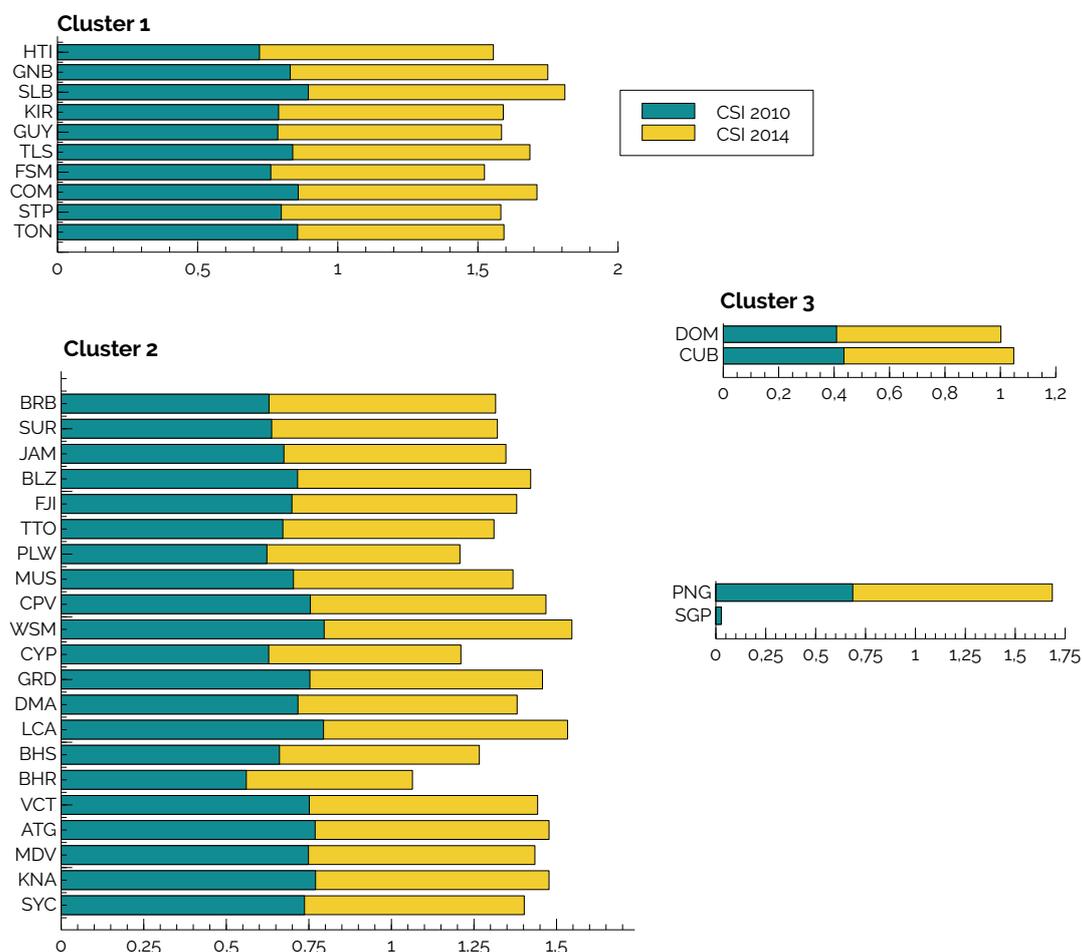


FIGURE 6.9 – Indice de durabilité des îles

demande d'électricité. Dans ces deux cas, la réponse à une augmentation de 15% de l'électricité a été une augmentation d'environ 3 à 4% de la part des combustibles fossiles dans le mix électrique. Ces analyses ont montré les trois principales situations (décrites par groupe) et les trois principales dynamiques pour une transition durable. Les PEID sont et seront les premiers à souffrir des effets du changement climatique, mais ils doivent également saisir l'opportunité d'être les premiers à réussir le défi de la transition vers une situation durable. Pour planifier un avenir durable, de nombreux efforts doivent être rapidement déployés pour limiter l'utilisation des ressources en combustibles fossiles tout en développant économiquement ces îles. En raison de leur taille, il sera probablement difficile de peser réellement sur les décisions de la communauté internationale, mais comme l'a montré notre analyse exploratoire des données, certains PEID présentent des similitudes et pourraient être regroupés. Toutefois, des contrastes importants sont observables, puisque des territoires pauvres, comme Tonga, Haïti et la Guinée-Bissau, sont opposés à des pays qui obtiennent un score supérieur à 0,8 pour l'IDH, comme Bahreïn, Chypre et Singapour. L'indice composite donne des

éléments qui suggèrent quels paramètres sont significatifs pour la stratégie politique visant à améliorer la durabilité des îles.

6.6.2 Durabilités des pays de l'UE

Dès les années 1990, l'Union européenne a publié son premier livre vert sur l'environnement urbain [EU 1990], qui identifiait le développement durable comme l'un des quatre grands principes directeurs pour améliorer l'environnement urbain. Le paquet énergie-climat adopté en 2008 et révisé en 2014 s'est concentré sur l'énergie avec les fameux objectifs "20-20-20" en matière de climat et d'énergie pour une Europe plus durable en 2020. Le développement durable et la lutte contre le réchauffement climatique sont allés jusqu'à figurer dans les traités établissant et faisant fonctionner l'UE. Les articles 3 du traité sur l'Union européenne et 11 du traité sur le fonctionnement de l'Union européenne rappellent l'engagement de l'Union Européenne en faveur du développement durable. De même, l'article 191 du traité sur le fonctionnement de l'Union européenne énonce les différents principes auxquels l'Union Européenne est attachée : le principe de précaution, le principe d'action préventive, le principe de la correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement et le principe du pollueur-payeur. Suite à la COP21 (2015), les 17 objectifs de développement durable (SDG) du programme de développement durable d'ici 2030 sont entrés en vigueur. L'Union Européenne peut-elle les atteindre ? Pour répondre à cette question, il est intéressant d'analyser la dynamique que les pays de l'Union européenne ont pu prendre de 2000 à 2015. L'engagement de l'Europe est fort depuis des décennies. La transition vers une Europe plus durable était bien engagée bien avant les accords de Paris en 2015. Pour analyser la pluridisciplinarité du développement durable, nous proposons l'étude des 28 pays de l'UE à travers une ACP regroupant les variables selon les trois piliers du développement durable. L'ACP nous permet ensuite de créer un indicateur de développement durable pour mesurer et classer les différents territoires selon leur niveau de durabilité et son évolution sur 15 ans.

Nous avons ainsi étudié les 28 pays de l'UE sur la période allant de 2000 à 2015. La mise en œuvre de notre indice est basée sur la combinaison des résultats de l'ACP et de l'approche de l'indice SDG, [Sachs 2019]. L'indice de durabilité a été défini comme suit :

$$SI = \prod_s \left(\sum_{k=1}^j \omega_k^s F_{ki}^s \right)^{1/3}, i = 1, 2, \dots, 28 \tag{6.6}$$

Où F_{ki}^s représente les coordonnées des pays sur les composantes principales k et

$\omega_k^s = \frac{\sqrt{\lambda_k^s}}{\sum_{k=1}^j \sqrt{\lambda_k^s}}$ le poids associés à chaque composante principal dans le calcul des sous-indices thématiques $s = \{ \text{Environment, Social, Economy} \}$. Les sous-indices composites représentant les trois dimensions du développement durable sont ainsi construits en agrégeant les composantes sélectionnées. Ceux-ci sont pondérés par ω_k^s , qui est basé sur les valeurs propres λ_k^s de chaque composante principale. Afin de prendre en compte de manière égale les trois dimensions du développement durable, l'indice SI est obtenu par l'agrégation d'une moyenne géométrique des trois sous-indices. La Figure 6.10 montre les résultats de le SI entre 2000 et 2015. La partie droite du graphique indique en noir et en gras les années où chaque

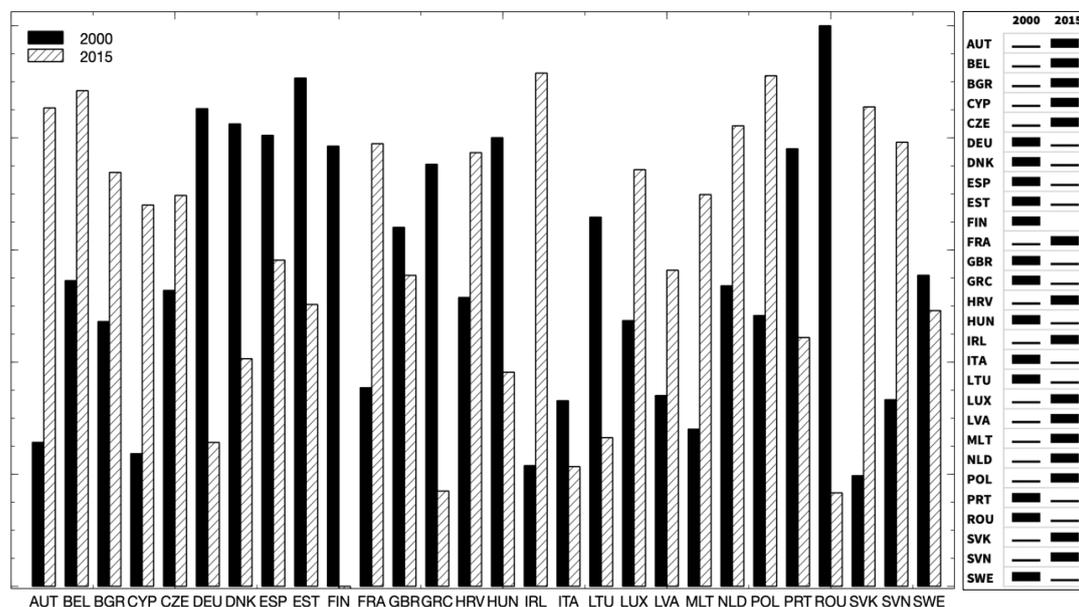


FIGURE 6.10 – Score de durabilité des pays de l’UE.

pays a obtenu un meilleur score à l’indice SI. Comme nous nous concentrons sur l’observation des dynamiques, le choix a été fait de ne pas classer les pays de l’UE. L’analyse des résultats montre un tableau très contrasté pour l’Europe. Les deux années ont enregistré un score SI supérieur dans des proportions presque égales. Cela montre qu’en dépit des discours et des annonces politiques dans de nombreux cas, une transition durable n’est pas en cours. Sur la base du sous-indice social, nous constatons que la situation sociale de l’ensemble s’est améliorée en quinze ans. Ceci est particulièrement marqué pour les pays d’Europe de l’Est, notamment la Roumanie. En ce qui concerne l’aspect économique, la plupart des pays ont un indicateur économique en hausse. Seuls quelques pays de l’Est, mais aussi la France, l’Allemagne et l’Italie connaissent une baisse de leur score économique. Enfin, les faibles scores s’expliquent aussi fortement par de mauvais résultats sur les aspects environnementaux. En effet, la grande majorité de l’Europe est devenue, au cours des quinze dernières années, la région la plus impactante en termes d’émissions de CO₂. Cela est principalement dû à un mélange d’électricité à plus forte intensité de carbone sur la période. Les quelques exceptions sont l’Espagne, le Portugal et l’Allemagne. L’exemple du Danemark est le plus frappant car le pays est passé de 15,45% à 65,5%, sur la même période, l’Europe n’augmente que de 13,9% à 29,2%. Ainsi, il semble clair que la décarbonisation du mix électrique a du sens lorsqu’elle se traduit en termes de vulnérabilité énergétique mais aussi d’aspect économique. Enfin, les résultats présentés dans cet article pourraient être considérés comme des lignes directrices pour les processus décisionnels gouvernementaux. La question de la limitation des émissions de GES par la décarbonisation du secteur électrique européen semble être un moteur intéressant pour la durabilité. En effet, les bénéfices peuvent être immédiats pour le sous-indice Environnement, mais aussi indirects pour les deux autres sous-indices par la création d’emplois et le développement d’une économie circulaire.

6.7 Synthèse

L'analyse de données est un champ qui fait partie intégrante de notre démarche de chercheur dans la logique de compréhension des territoires. Ce type d'approche s'avère particulièrement intéressante dans la mesure où l'on souhaite parfois pouvoir mesurer des "phénomènes" qui ne répondent pas à une mise en équation au sens classique du terme. Ainsi, il est alors possible de formaliser des indicateurs, des analyses permettant d'observer les changements. Ce type d'analyse nécessite une validation croisée à partir du contexte réel du terrain. Ces éléments de validation permettent de formuler les hypothèses expliquant les changements observés, de valider si l'analyse que nous en faisons a bien du sens à partir de données complémentaires ou à partir d'experts. Ces méthodologies que nous avons mis en oeuvre depuis près de 6 ans, ce sont systématiquement généralisés dans nos projets afin de toujours avoir une lecture holistique de nos problématiques de recherche. Elles nous permettent de systématiquement comprendre les conditions initiales des objets de recherche et de leur environnement, avant de s'attacher à en modéliser des aspects.

Mon champ d'analyse s'est placé depuis plusieurs années à l'échelle des espaces bâtis et des territoires. En science des données, en particulier dans les analyses, on peut résumer cela à une simple inversion de matrice. Le plus important se situe dans l'identification des données et leurs principales caractéristiques vis-à-vis de la problématique que l'on souhaite étudier.

VALORISATION – 3 articles revue en évaluation, 2 communications. Les travaux menés ont reçus le financement des projets TRANSEETER (Université de la Réunion) , PHC Réduit.

ENCADREMENT – Ce travail s'est fait avec la collaboration des étudiants de la promotion 2018 du Master EBENE

FORMATION – Une conférence à été proposée dans le cadre des Journées de Recherche des ISTs de Madagascar, 1 formation est en préparation pour les étudiants doctorants de l'Université d'Antananarivo sur la construction d'indicateur.

Comprendre et construire des territoires en transition

Sommaire

7.1 La ville durable	115
7.1.1 Quels enjeux pour un urbanisme durable en milieu tropical ? .	116
7.2 Quels impacts entre les projets d'aménagement et le territoire ?	118
7.3 Mode d'habiter et qualité de vie : indicateur de durabilité.	120
7.3.1 Habiter et durabilité	121
7.3.2 Méthodologie	122
7.3.3 Analyse des données	123
7.3.4 Conclusion	125
7.4 Vers une approche multidimensionnelle de la durabilité	126
7.5 Synthèse	128

LE concept de la "ville durable" est aujourd'hui une parfaite illustration des transformations socioécologiques que doit engager notre société [Lockie 2013] pour minimiser son impact sur l'environnement et minimiser sa dépendance à des ressources finies. Bien que les contours de la définition ne soient pas aisés et qu'on n'obtienne pas toujours de consensus, le caractère *transitional* de la durabilité semble à ce jour indiscutable [Hamman 2017]. Ce chapitre s'attachera à présenter nos questionnements de recherche sur ce thème. Au-delà des questions en lien avec l'environnement ou des activités anthropiques, j'aborderai ce thème à travers un spectre large. Nous traiterons des enjeux du mode d'habiter à travers la perception des habitants, mais également des questions de la durabilité des projets d'aménagement urbain. Mes travaux sur la transition à l'échelle des territoires se focalise en particulier sur les milieux insulaires et tropicaux.

7.1 La ville durable

À la suite du sommet de Rio en 1992, la problématique du développement durable a été l'objet d'une territorialisation de ces enjeux et objets. Ainsi la ville devient le lieu où

l'on teste différentes dynamiques du développement durable selon les projets [Theys 2020, Emelianoff 2002]. Les premières définitions de la ville durable renvoient à la capacité d'autosuffisance, [Morris 1982] sans que le coût de son développement ne soit supporté par un environnement voisin [D Mitlin 1994]. La question de l'empreinte écologique est abordée par [Ress 1996] en mettant en garde sur les conséquences des modèles de développement territoriaux peu compatibles avec une sobriété environnementale. La prise en compte de ces problématiques écologiques est de nos jours indispensable au moment où les discours de la transition énergétique glissent vers une transition écologique. Toutefois, [Mancebo 2011] rappelle que les impératifs du changement climatique et du développement durable ne sont pas toujours compatibles. Bien souvent, la question environnementale l'emporte au détriment d'enjeux tout aussi importants de la durabilité tels que la qualité de vie, du bien-être, de la justice sociale, etc. Une synthèse de l'évolution de ces définitions a été proposée par [Emelianoff 2007], qui précise en particulier la notion de dynamique et met en exergue le caractère évolutif de la ville durable. Le développement de ces villes et territoires durables nous renvoie à une approche holistique et systémique des enjeux et des objets recourant plus à l'expérimentation et à l'analyse des dynamiques qu'à la définition d'un modèle à proprement parler. Comme le dit [Rogers 2008] " *construire une ville durable exige une discipline holistique dans la planification* ". Les outils de l'ingénierie concourante sont particulièrement adaptés au projet urbain comparativement à une approche séquentielle. Le choix d'un projet durable oblige à de la flexibilité dans l'action afin de permettre les échanges entre différentes thématiques (social, environnement, économie, confort thermique, qualité de vie, etc.) [Dind 2007]. De plus, il est primordial d'inscrire le projet dans une démarche itérative où l'on questionne en permanence les choix et les bases de connaissance (retours d'expérience), au lieu de vouloir systématiquement reproduire des "bonnes pratiques". On aboutit ainsi à l'importance de la réversibilité des actions et de l'expérimentation.

Ces questionnements de la durabilité revêtent un aspect particulier dans un contexte insulaire comme celui de la Réunion. Nous aborderons dans le paragraphe suivant quelques traits caractéristiques du contexte local avant de décliner quelques exemples de travaux actuellement menés.

7.1.1 Quels enjeux pour un urbanisme durable en milieu tropical ?

En 2020, l'ONU estime que 43% de la population mondiale soit près de 3,8 milliards de personnes vivent sous les tropiques. D'après un récent rapport *State of the tropics*, d'ici 2050 un peu plus de la moitié de la population mondiale résiderait dans les tropiques [Penny 2020]. Cette inversion des "masses" devrait intervenir dès 2030 ce qui compte tenu des conditions socio-économiques amène plusieurs questionnements. Il est aujourd'hui important de repenser les priorités en ce qui concerne les aides, le développement ou encore la recherche associés à ces régions. L'urbanisation dans ces régions induit naturellement la nécessité d'anticiper la construction de logements répondant aux besoins de cette pression démographique, mais également en adéquation avec l'environnement. Ce dernier point est un point focal de notre travail qui repose sur le fait de penser la ville durable tropicale, en

réfléchissant à une conception bioclimatique adaptée aux conditions climatiques tropicales. Mais il s'agit également d'aborder (cf. dernier chapitre) la question de l'environnement au prisme de l'analyse de vie et d'une économie circulaire.

Construire la ville durable tropicale sous-entend de devoir prendre en considération des contraintes exogènes liées au climat par exemple et endogènes liées à la définition même du projet. La résilience vers laquelle doivent tendre nos villes est d'autant plus importante que nous sommes aux premières loges des effets du réchauffement climatique. Bien que beaucoup d'incertitude entoure encore ces modèles, [Walsh 2016, Qin 2014] soulignent qu'une projection consensuelle admise est une diminution mondiale des cyclones tropicaux de 5 à 30%. Toutefois, étude plus spécifique sur la zone O.I. de [Malan 2013] met en avant une augmentation du nombre de jours de tempêtes de niveau 3, où dans le même temps le nombre de cyclones tropicaux diminue. Devant ces incertitudes, il sera par exemple important de considérer les épisodes cycloniques comme contrainte forte dans les projets durables du territoire. D'autres conséquences plus immédiates concernant le confort thermique dans les bâtiments qui se retrouveraient fortement impactés par une augmentation de la température de +2°C d'ici 2100.

Très éloignée des problématiques des grandes concentrations urbaines, la Réunion a vu son territoire se transformer rapidement en 40 ans. Dès 1950, il y a eu une volonté d'un alignement de notre département sur le niveau national. Cette modernisation a été plus rapidement observable en ville, du fait d'une densité de la population et des changements de modes d'habiter induit [Jauze 2005]. Ainsi on assiste dès les années 1960, au passage d'un habitat individuel *kaz atèr*¹ à un logement collectif *kaz anlèr*². Ce passage brusque et parfois subi n'a pas été sans appréhension auprès de la population réunionnaise. Initialement organisé entre la *kaz* et la *kour* (jardin), l'art de vivre à la réunionnaise a du se réorganiser en un mode d'habiter en collectivité sans espaces extérieurs immédiats [Watin 2010]. Cette réorganisation fait dire à E. Wolff que ce modèle importé semble dichotomique vis-à-vis des pratiques existantes localement [Wolff 1989].

Aujourd'hui, comme le souligne J.M. Jauze "*Nous sommes dans une île où le centre est la périphérie, et la périphérie le centre*" [Jauze 1998]. En effet, comme le montre la Figure 7.1, il y a une concentration de la population (85%) sur le littoral et les basses pentes de l'île (< 600m soit 1/3 de la surface totale). La topographie explique en partie cette organisation périphérique et ce déséquilibre entre les hauts et les bas. Si l'on se réfère aux travaux de [Jauze 2005], l'armature urbaine réunionnaise est macrocéphalique du fait de la prédominance de Saint-Denis qui porte la triple caractéristique de chef-lieu, capital insulaire et régional. Le réseau urbain est dès lors qualifié de périphérique. Au second rang, on retrouve d'autres communes comme Saint-Pierre qui concentre une activité économique et culturelle conséquente et qui est qualifiée de pôle régional d'équilibre dans le bassin sud. Finalement, c'est la conjonction de paramètres historiques, économiques, topographiques et sociaux qui ont modelé l'espace urbain et la ville réunionnaise. Cette ville, jeune demeure aujourd'hui en mutation. Dans le livre blanc sur la ville durable réunionnaise [DEAL 2016], où l'on pose les bases d'une ré-

1. Case à terre
2. Case en l'air

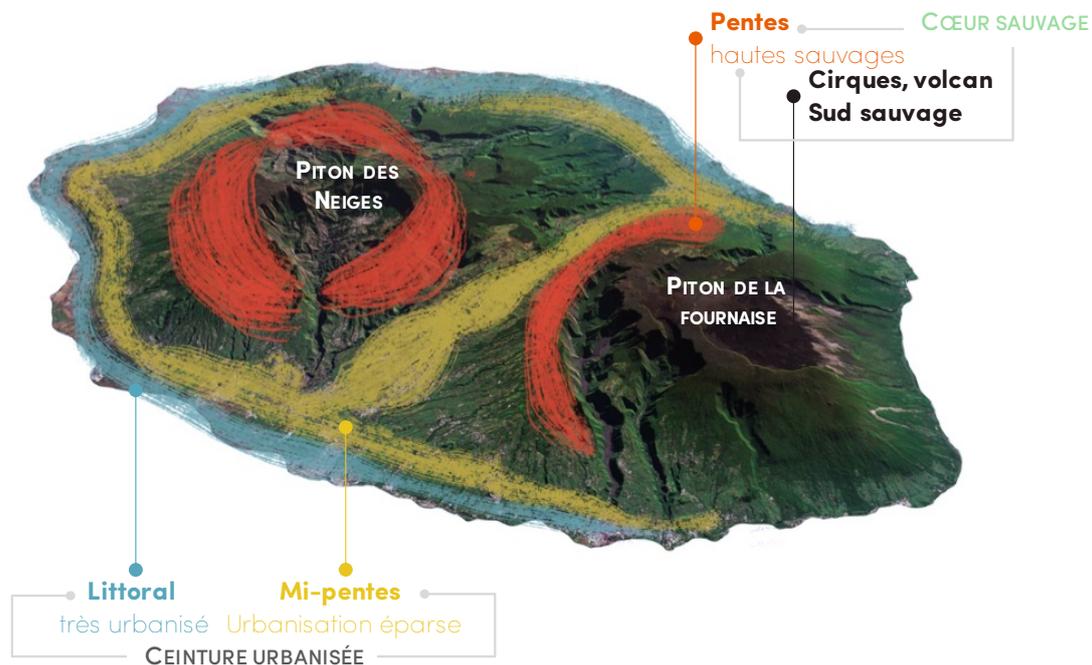


FIGURE 7.1 – Croquis de l'urbanisation concentrique de la Réunion

flexion pour penser les villes durables tropicales de demain, on retrouve bien le caractère systémique qu'appelle la notion de ville durable à savoir une ville :

- sobre et soutenable en interaction avec les potentialités de son territoire ;
- ancrée dans le territoire et répondant aux pratiques locales ;
- incluant la population dans les choix et la gestion ;
- porteuse d'innovation.

Toutes ces ambitions territorialisées à l'échelle des quartiers, villes ou intercommunalités trouvent un terrain d'expérimentation de l'innovation de l'action urbanistique dans un contexte tropical. Ainsi l'un de nos questionnements a été d'identifier dans quelles mesures les projets dits *durables* à l'échelle du territoire peuvent avoir une influence sur les quartiers adjacents.

7.2 Quels impacts entre les projets d'aménagement et le territoire ?

Cette problématique a été initiée dans le cadre des travaux de thèse de Kelvin Pavade-poullé. Depuis un peu plus de 15 ans, les projets d'aménagement qualifiés de *durables* fleurissent sur le territoire réunionnais. Initié à l'échelle nationale au début des années 2000, on retrouve les premiers exemples d'écoquartier, dans le cas de programme de renouvellement urbain tel que l'opération de l'ANRU de Ravine Blanche à Saint-Pierre. Ces projets supposés

être "exemplaires" font parfois l'objet de critiques, du fait de leur distance avec les attentes du développement durable. En résumé, ils sont vus plus comme des outils de communication auxquels on adjoint des opérations urbaines éco-compatibles [Boutaud 2009]. Ainsi, comme le décrit [Bonard 2010] l'écoquartier est un laboratoire expérimental *in situ* et *in vivo* de la ville durable à travers les évolutions du tissu urbain. Ce sont donc ces changements ou impacts que nous souhaitons mesurer et observer à l'échelle du territoire. Il y a d'inscrit dans la démarche de développement durable la nécessité de l'évaluation des projets afin de collecter le maximum de retours d'expérience. Ces suivis peuvent prendre de nombreuses formes : l'enquête, le diagnostic en marchant, le bilan post projet avec les usagers, indicateurs, etc. Et c'est sur ce dernier aspect que nous nous sommes intéressés à travers deux projets : la RHI de l'Éperon dans l'ouest et la ZAC Beauséjour dans le nord. La démarche d'évaluation est aujourd'hui incontournable, quel que soit sa nature qualitative ou quantitative, et cela même pour des opérations complexes [Jégou 2012].

Pour évaluer les projets, nous avons procédé en deux étapes :

- Définition d'un indicateur composite selon les méthodes abordées dans le chapitre précédent ;
- Détermination d'un indice de Moran local basé sur l'indicateur composite.

Largement utilisé dans les études d'autocorrélation spatiale, l'indice global ou local de Moran est l'un des plus repris dans la littérature [Oliveau 2010]. La définition des indices d'autocorrélation est initiée en 1950 par les travaux de Moran [Moran 1950]. Le passage à une formulation locale vient du constat fait par [Getis 1991, Getis 2010] que le I Moran³ global ne permet pas d'analyser les interrelations à de petites échelles spatiales. La formulation à proprement parlé du I de Moran local a été proposé par [Anselin 1995] et s'exprime sous la forme suivante :

$$I = \frac{z_i - \bar{z}}{\sigma^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n [W_{ij} (z_j - \bar{z})] \quad (7.1)$$

Où z_i représente la valeur de l'indicateur composite au point i de moyenne \bar{z} ; j sont les voisins de l'individu i observé avec $j \neq i$; σ^2 est la variance de z et W_{ij} est la matrice de pondération.

L'indicateur composite construit à partir de l'analyse en composantes principales repose une fonction linéaire dont les paramètres sont des données sur la population, la mobilité, l'emploi, l'habitat. Les résultats sont présentés à la Figure 7.2, ainsi dans le cas de la RHI de l'Éperon on voit que le projet a eu pour effet de dynamiser et de le connecter à son territoire. Toutefois, on note des autocorrélations négatives avec des quartiers adjacents. Cela semble indiquer que même si le projet de rénovation est réussi, son influence semble tellement important que cela finit par être subi par les quartiers environnants. Finalement, on y voit l'illustration d'un projet où l'iris i est réussi, mais l'impact associé ne l'est pas forcément. La question se pose alors de savoir si dans la réflexion d'une opération d'aménagement il est possible d'inclure un périmètre plus large d'influence permettant d'étendre de plus petites actions aux zones adjacentes afin de maintenir un développement équilibré du territoire étudié.

L'opération de la ZAC Beauséjour, labellisée écoquartier, met en évidence également la forte

3. Raccourci d'écriture communément utilisé

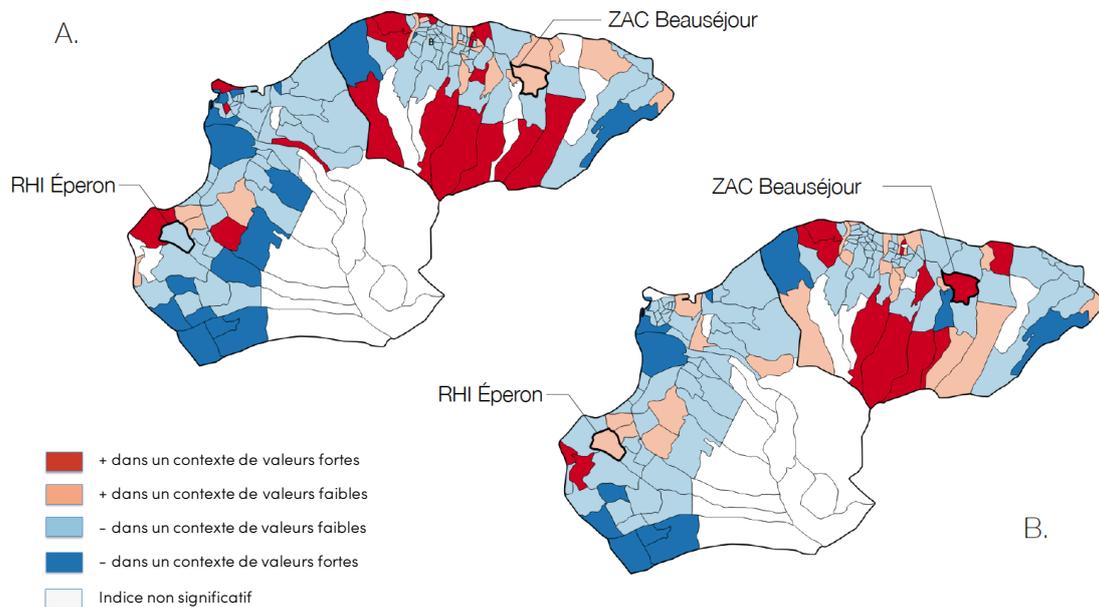


FIGURE 7.2 – Cartographie de l'indicateur composite spatiale entre 2006 (A) et 2012 (B) – [Pavadépoullé 2017].

valeur ajoutée de ce quartier qui là aussi se fait au détriment des IRIS voisins. Bien que d'autres enquêtes de terrain ont été menées afin de définir les caractéristiques de ce regain d'attractivité, il est important de pouvoir tester l'ensemble de nos hypothèses. L'une des premières conclusions issues de ces deux cas est d'imaginer comment réussir à construire des projets d'aménagement qui soient dynamiques non seulement pour le quartier concerné, mais également ses proches voisins. Dans le cadre de ces travaux, notre postulat de départ était de questionner sur le rayonnement d'un projet dit durable sur son environnement immédiat. Nous avons de façon optimiste plutôt envisagé une influence positive à la manière d'une *diffusion thermique* qui s'estomperait à mesure que l'on s'éloigne de la source de chaleur. Par conséquent, c'est ce que nous souhaitions mesurer. Les résultats nous ont amenés à complètement revoir la façon d'appréhender l'impact des projets et par conséquent de réfléchir à la formulation d'un indicateur global de performance du projet, qui aurait un caractère dynamique dans le temps. L'objectif serait de traduire à travers un outil unique la qualité interne d'un projet, mais également mesurer son impact sur les espaces limitrophes.

7.3 Mode d'habiter et qualité de vie : indicateur de durabilité.

Les écoquartiers ne sont pas toujours le gage de l'émergence d'un habiter durable, et la réussite de ces projets dépendrait de leur congruence avec les habitants, dans le sens où ces projets devraient être pensés de façon à ce qu'ils ne nuisent pas aux besoins et aspirations des habitants [Burton 2013, Moser 2002, Turkoglu 2015]. En effet, les individus évaluent la

compatibilité entre les projets, leurs préoccupations sur l'habitabilité du lieu, leur qualité de vie, et au final les plébiscitent ou les rejettent. Par conséquent, la question de l'habiter est importante quand on cherche à développer un quartier durable ou instaurer un mode de vie durable. Ainsi, au-delà des spécificités climatiques, compte tenu d'une histoire urbaine, de pratiques de l'espace et d'un rapport à l'habiter qui lui sont propres, la ville durable réunionnaise ne peut faire l'économie d'une réflexion sur l'habiter, au risque de créer des ruptures dans le contexte socioculturel, et proposer des quartiers durables peu congruents à l'habiter local, à la croisée d'une société traditionnelle créole et une société moderne européenne [Watin 1991] et qui pourraient alors s'avérer peu durables dans la réalité par un manque d'appropriation de ces derniers.

Dès lors, qu'en est-il de l'habiter et des représentations de la qualité de vie à La Réunion, peuvent-ils influencer l'appropriation de la ville réunionnaise durable ?

Ce travail cherche à saisir les représentations sociales du quartier idéal à l'heure actuelle afin de produire un savoir sur l'habiter à La Réunion, d'identifier et de décrire les éléments concourant à sa définition, et d'analyser comment il s'inscrit dans le développement du quartier durable réunionnais. En effet, il s'agit d'analyser la congruence entre les conditions idéales identifiées et celles proposées par l'aménagement durable aujourd'hui sur le territoire. Au final, ce travail permettra de dégager les conditions d'aménagement favorables à la qualité de vie, donc en adéquation avec l'habiter et qui permettraient ainsi l'appropriation des aménagements durables. L'acceptabilité sociale des aménagements durables sera discutée en fonction de la configuration des représentations sociales définies ici et permettra ainsi de mieux comprendre les barrières et moteurs au quartier durable réunionnais.

7.3.1 Habiter et durabilité

Inspiré des approches géographiques, l'habiter est un concept complexe à définir. Habiter, c'est une manière de faire avec les lieux, c'est composer ses actions, son espace de vie en interaction avec les autres et y trouver un sens. Les choix résidentiels, les activités quotidiennes, les habitudes de loisirs et de mobilité, sont autant de manières de pratiquer les lieux qui définissent l'habiter. Au-delà de cet aspect fonctionnel, il faut aussi comprendre l'habiter comme un mode d'investissement d'affects, d'imaginaires et d'émotions, où habiter implique de faire de l'espace une représentation de soi, s'appropriier le lieu et s'y identifier [Stock 2004]. L'habiter renvoie aux préférences, besoins et attentes au travers desquels les habitants produisent l'espace et définissent son fonctionnement [Roux 2002, Stock 2004, Renaud 2012, Mathieu 2016]. L'habiter permet de saisir les représentations de l'environnement et les interactions des individus avec ce dernier, et offre ainsi une compréhension de la façon dont le sujet comprend et explique sa réalité environnementale et comment il se l'approprie. En effet, en fonction de leurs besoins, aspirations, manière de pratiquer le lieu, les individus expriment des préférences en matière d'environnement et ces dernières peuvent par la suite déterminer leurs réponses comportementales. En effet, quand le quartier ne correspond plus aux caractéristiques préférées des personnes ou à leur image d'eux-mêmes, il en résulte un stress résidentiel et un sentiment de détachement au quartier et tout cela peut au final conduire à un désengagement et l'intention de partir [Mohit 2012].

Ainsi, bien plus que de travailler à l'acceptabilité des nouveaux projets, consulter la population sur leurs représentations de la "*désirabilité environnementale*" [Félonneau 2007] représente un moyen de travailler en amont à une intégration cohérente et congruente des projets d'aménagement dans l'environnement social et culturel, de penser un projet auquel les habitants se sentent d'emblée appartenir et dans lequel ils veulent s'engager [Manzo 2006].

La vie dans un environnement insulaire tropical où il a fallu s'adapter à des conditions souvent difficiles (isolement, chaleur, humidité, violence des cyclones), à partir d'un projet spécifique d'appropriation et de mise en valeur de l'espace, au travers de l'économie de plantation, a produit un habiter créole spécifique. Il se caractérise par la case à terre, espace de vie privé qui comporte une large proportion d'espaces plantés de potagers, de vergers où se mêlent plantes utiles et décoratives. Il a mis en place un mode d'occupation rural et une structuration des lieux autour du *Kartié* un espace de vie sociale et de solidarité construit autour d'individu ayant une filiation commune ou qui ont créé une alliance et qui fonctionnent comme une communauté autour du projet commun de plantation [Watin 1991]. Avec la modernisation apportée par la départementalisation, ce modèle a perduré, et l'habiter réunionnais serait comme à l'image de sa population un métissage entre habiter traditionnel et moderne, mais dont les représentations et expressions actuelles n'ont pas encore été totalement saisies et qui peinent à se traduire dans les programmes d'aménagement du territoire.

Ainsi, au travers de l'analyse des représentations et interactions des individus et de leur environnement, ce travail souhaite offrir une compréhension de la façon dont les sujets réunionnais construisent l'objet urbain et peuvent se l'approprier dans le cadre du développement durable.

7.3.2 Méthodologie

Le recueil de données a été réalisé à partir d'entretiens semi-directifs ayant pour objectif l'étude de la qualité de vie dans les quartiers réunionnais. Il visait à interroger les participants sur leurs représentations du quartier idéal, en matière d'habiter et de qualité de vie. L'interview commençait par l'analyse du parcours résidentiel. L'enquêté décrivait son parcours de vie résidentiel, ses origines, les critères de choix de son lieu de vie. Dans un second temps, la perception du quartier actuel de résidence a été questionnée. Afin de relancer l'enquête, il a été demandé de parler de son quartier, les atouts, les inconvénients et les choses qu'ils souhaiteraient changer en lien avec leurs besoins, usages et sa qualité de vie. Enfin, l'interview se terminait par une tâche d'association de mots, à partir du stimulus "*quartier idéal réunionnais*" pour saisir l'univers représentationnel des sujets.

Au total 55 entretiens semi-directifs ont été menés auprès d'habitants en résidence principale, sur différentes communes de l'île, entre octobre 2018 et Juillet 2019. Les entretiens duraient en moyenne 45 minutes et se sont principalement déroulés au domicile des enquêtés. Après les entretiens et leur retranscription, l'analyse psychosociale a d'abord consisté en une analyse statistique textuelle grâce au logiciel IRAMUTEQ. Basée sur une classification hiérarchique descendante (CHD) ce logiciel analyse des classes de mots représentatives du discours.

Ainsi nous souhaitons dégager les thèmes importants et les classes de mots représentatives

pour au final identifier les éléments, les critères importants constitutifs des représentations du quartier idéal réunionnais comme moyen de comprendre l'habiter (voir Figure 7.3). Le repérage des représentations sociales du quartier idéal est susceptible d'éclairer la signification des conduites spatiales et au final de dégager les conditions d'aménagement favorables à la qualité de vie, donc en adéquation avec l'habiter.

7.3.3 Analyse des données

Le χ^2 calculé pour chaque mot indique son lien statistique, plus ou moins fort, avec la classe. Les classes obtenues par le logiciel sont ensuite interprétées par le chercheur qui leur confère une cohérence thématique. A partir de l'ensemble des entretiens retranscrits, le logi-

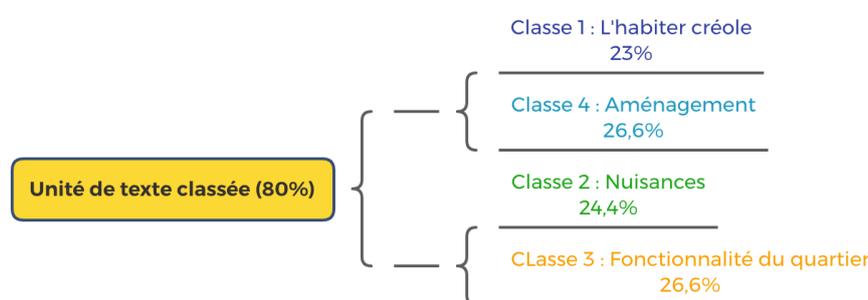


FIGURE 7.3 – Dendrogramme de la classification hiérarchique descendante.

ciel a utilisé 80% du contenu et a dégagé 4 classes thématiques illustrant les représentations socio-spatiales du quartier idéal réunionnais.

La première classe, « **l'habiter créole** », contient 23% du contenu traité. Elle contient des mots qui renvoient à l'importance de la vie sociale : « monde » ($\chi^2 = 11.25$, $p < .001$), « social » ($\chi^2 = 32.94$, $p < .001$), « ensemble » ($\chi^2 = 24.53$, $p < .001$), « voisin » ($\chi^2 = 12.12$, $p < .01$), « réunion » ($\chi^2 = 16.23$, $p < .001$), « partager » ($\chi^2 = 16.20$, $p < .01$), lien ($\chi^2 = 10.10$, $p < .01$), « aider » ($\chi^2 = 9.00$, $p < .01$). Le quartier idéal est un espace de vie sociale, intra-communautaire ou l'on se connaît et se côtoie mutuellement et que l'on construit ensemble. Un certain nombre d'attributs référant à l'environnement naturel est associé à cette classe : « végétation » ($\chi^2 = 13.59$, $p < .001$), « animaux » ($\chi^2 = 11.45$, $p < .001$), « verdure » ($\chi^2 = 10.00$, $p < .01$), jardin ($\chi^2 = 10.00$, $p < .01$), « potager » ($\chi^2 = 7.60$, $p < .01$). L'environnement naturel est vu comme un catalyseur du vivre créole et de la vie sociale.

La seconde classe, appelée « **nuisances** » représente 24,4% du corpus traité. Cette classe se caractérise par des mots qui renvoient à des nuisances telles que le bruit ($\chi^2 = 71.44$, $p < .001$) ou la pollution ($\chi^2 = 28.44$, $p < .001$), chaud ($\chi^2 = 11.37$, $p < .001$). Les causes de ces nuisances sont soulignées avec les termes la « route », ($\chi^2 = 13.18$, $p < .001$), la « circulation » ($\chi^2 = 12.91$, $p < .001$), « voiture » ($\chi^2 = 32.76$, $p < .001$), « vitesse » ($\chi^2 = 13.18$, $p < .001$), « embouteillage » ($\chi^2 = 13.18$, $p < .001$) ainsi que le milieu « dense » ($\chi^2 = 9.70$, $p < .001$). Ces nuisances sont associées à l'urbanisation avec l'évocation des termes «

urbains » ($\chi^2 = 24.44$, $p < .001$), « ville » ($\chi^2 = 10.00$, $p < .001$). Cette classe est composée des représentations quant à la typologie de l'espace idéal, opposant l'urbain non désiré à l'espace rural (campagne, les hauts de l'île). Au travers de cette classe, c'est l'opposé du quartier idéal qui est présenté.

La troisième classe réfère à la « **fonctionnalité du quartier** » et contient 26,6% du contenu analysé. Elle met en exergue l'importance de la « proximité des services » ($\chi^2 = 91.73$, $p < .001$) et leur « accès à pied » ($\chi^2 = 51.91$, $p < .001$) ainsi que des termes tels que « trottoir » ($\chi^2 = 14.01$, $p < .001$), « 10mn » ($\chi^2 = 7.71$, $p < .001$) qui définissent les critères de fonctionnalité selon les enquêtés. Le deuxième aspect de la fonctionnalité met en avant les services et commerces importants. On y voit apparaître les termes : « médecin », ($\chi^2 = 42.42$, $p < .001$) « pharmacie » ($\chi^2 = 39.62$, $p < .001$), « école » ($\chi^2 = 39.627$, $p < .001$), « la poste » ($\chi^2 = 23.25$, $p < .001$) « boulangerie » ($\chi^2 = 16.30$, $p < .001$), « marchand de fruits et légumes » ($\chi^2 = 12.00$, $p < .001$), « les snacks, la médiathèque ou encore l'église » ($\chi^2 = 7.75$, $p < .001$).

La quatrième classe « **aménagement** » représente 26,6% du corpus analysé. Cette classe est dominée par un champ lexical de l'aménagement « mettre » ($\chi^2 = 46.96$, $p < .001$), « aménager » ($\chi^2 = 10.00$, $p < .001$), « construire » ($\chi^2 = 8.89$, $p < .001$), « gérer » ($\chi^2 = 7.65$, $p < .001$); Ils mettent avant l'organisation idéale du lieu de vie sur le plan de l'aménagement notamment en ce qui concerne les "immeubles" ($\chi^2 = 36.87$, $p < .001$), les appartements ($\chi^2 = 13.92$, $p < .001$), « les parcs » ($\chi^2 = 17.51$, $p < .001$), les arbres ($\chi^2 = 15.48$, $p < .001$), les jardins ($\chi^2 = 8.75$, $p < .001$). En parallèle, des mots comme « peur » ou « stress » sont évoqués pour identifier les éléments à rejeter. Les termes « montagnes » et « mers » sont aussi évoqués dans cette classe, comme éléments importants à prendre en compte dans l'aménagement. On sent un souci quant à l'aménagement de leur lieu de vie, et un désir environnemental tourné vers la nature, et une organisation de l'espace plus « traditionnelle » dans l'idée d'un aménagement moins urbanisé plus rural et qui permet le style de vie tourné vers l'extérieur.

Ainsi, au travers de ces analyses, il est possible d'appréhender les représentations du quartier idéal réunionnais, les modes d'habiter réunionnais et représentations de la qualité de vie qui permettent de révéler comment le lieu est habité, investi et approprié, par la suite de les mettre en lien avec le développement de quartier durable et ainsi voir les moteurs et freins potentiels. Les résultats proposés mettent en avant des représentations de la qualité de vie corrélées à un mode d'habiter tourné vers l'extérieur, communautaire et lié à la nature. Dans les échanges il apparaît une représentation à connotation négative d'une trop forte urbanisation et densification, que l'on retrouve dans la littérature [Cho 2011, Ng 2003]. Pourtant aujourd'hui présentée comme solutions pour la ville durable, les modèles de densification suscitent de réelles inquiétudes qui résideraient dans la perception d'un écart entre ces modèles, l'habiter créole et la qualité de vie, comme le suggère l'opposition entre les classe 1, 4 et la classe 2 sur le plan factoriel.

Dans les échanges avec les enquêtés, la "kaz ater", maison individuelle avec jardin, est souvent évoquée comme critère idéalisé de la qualité de vie et fondement de l'habiter réunionnais. Si l'attachement à ce modèle résulte d'un sentiment d'habitation à une densité

bâtie et humaine limitée et à l'idéal rural, c'est également parce qu'il répond à certains besoins et aspirations des habitants. Le modèle du quartier à "kaz ater" est apprécié car il répond d'une part au désir d'espace, de calme (rupture avec les nuisances extérieures), de confort thermique, d'intimité et d'autre part, il répond au style de vie tourné vers l'extérieur et les usages traditionnels associés tels que les petits élevages, les cultures aromatiques et médicinales, la cuisine au feu de bois et la vie sociale et communautaire qui en découle. " *L'idéal pour moi c'est la case à terre avec mon petit bout de cour, avoir mes deux volailles, c'est comme ça qu'on a l'habitude*" (Irfane, 32 ans, Saint-Pierre).

Le modèle du quartier avec la "kaz atèr" est également valorisé car il permet de maintenir un style de vie tourné vers l'extérieur, un aspect important de l'habiter. Pour les enquêtés vivre à La Réunion, c'est vivre en extérieur, pouvoir jardiner ou cultiver, avoir un petit potager. Les enquêtes perçoivent la densité de population et de bâtiments, la promiscuité des espaces extérieurs (balcon ou espaces publics) et la vie en collectif, comme nuisant à leur style de vie tourné vers l'extérieur. " *Non parce que si on veut vraiment que les gens vivent bien c'est le système de retourner dehors, parce que quand on est dans un bloc de béton, on sort du boulot, on arrive, on rentre chez soi et on est dans un bloc de béton on est encore enfermé, lé pa gayard!* " (Techer, 42 ans, Le Port). Si cela implique un style de vie tourné vers l'intérieur et une potentielle hausse des consommations énergétiques, c'est surtout de la dimension socio-culturelle du quartier dont il est question. Les aspects socio-culturels sont importants dans les représentations de la qualité vie, et il apparaît au travers des échanges que la perception d'une urbanisation et densification à outrance participerait à une certaine acculturation et au développement d'une anomie. La "kaz atèr" porte l'idéal du quartier créole, communautariste, au travers d'un rapport productif au jardin qui maintient les échanges socio-économiques, le développement des liens sociaux dans les quartiers et ainsi la convivialité et solidarité entre voisins. Les habitants considèrent que la vie dans les immeubles en hauteur peut nuire à leurs traditions, dont cette possibilité de s'investir dans les activités traditionnelles et les bénéfices socio-économiques et communautaristes associés.

7.3.4 Conclusion

Ce travail s'intéressait aux modes d'habiter et représentations de la qualité de vie dans les quartiers à La Réunion, et développait une réflexion sur leur intégration sur les nouveaux modes d'habiter durables. Sur la base de nos résultats, on observe que les habitants accordent une grande importance à la vie de plein air, au lien à la terre et à la nature et aux questions communautaires. Avoir un lien avec l'extérieur, et vivre en présence de nature est considéré comme faisant partie intégrante du style de vie à la réunionnaise et ces critères peuvent influencer les représentations de la qualité de vie, notamment en matière de confort thermique, d'intimité et au final l'appropriation ou le rejet des modèles de densification urbaine. Il en est de même pour l'aspect communautaire, les habitants tiennent au caractère familial et solidaire du quartier créole traditionnel, conceptualisé par [Watin 1991] comme le "Kartié" un espace d'interconnaissance qui structure la vie sociale réunionnaise. Ces résultats pourraient aider à informer les décideurs et les concepteurs sur les attributs clés qui améliorent

la qualité de vie dans les quartiers à La Réunion et qui pourraient influencer l'appropriation des projets durables. Plus particulièrement, ces résultats soulignent la nécessité d'une approche de conception pouvant atténuer l'impact environnemental des nouvelles politiques urbaines, tout en améliorant la qualité des décisions, et de fait permettant le développement de projets où la population est d'office bien intégrée. Au final, ce travail consultatif généralisable à d'autres contextes permettrait de limiter des erreurs constatées lors des évaluations post-occupations, là où il est parfois trop tard et plus coûteux de remédier aux erreurs.

7.4 Vers une approche multidimensionnelle de la durabilité

Dans la continuité de la partie précédente, évaluer la durabilité des projets d'aménagement durable à travers des indicateurs appelle à s'interroger sur leur réelle soutenabilité. Ces travaux sont menés dans le cadre de la thèse de Eve Etienne. L'étude, réalisée dans le cadre du programme Résilience Innovation Réunion (RESINNOVRUN), propose une méthodologie d'évaluation de la soutenabilité des projets d'aménagement durables. L'idée générale de ce travail repose sur une adaptation de la méthode des cercles de soutenabilité, et qui utilise à la fois des variables quantitatives et qualitatives. Cette approche offre ainsi une lecture systémique de la durabilité permettant la prise en compte de l'ensemble des thématiques contribuant à la production de la ville durable.

La méthodologie permet une appréhension à plusieurs échelles d'un projet. On peut ainsi analyser un projet urbain du bâtiment au territoire. Elle s'avère particulièrement intéressante, car utilisable en phase projet, pour objectiver les choix ou pour évaluer dans le temps la qualité de la production vis-à-vis des prévisions du projet initial. La grille d'évaluation est organisée de la sorte : 6 thématiques associées eux-mêmes à un total de 10 sous-thèmes décrits par 93 variables. La définition de cette architecture ne s'est pas faite *ex nihilo*. En effet, nous nous sommes inspirés des plusieurs cadres déjà existants à la Réunion. Finalement, les indicateurs quantitatifs et qualitatifs retenus ont été :

- 35 des 40 indicateurs de l'Agenda 21 ;
- les 40 indicateurs et critères du label Écoquartier ;
- 15 critères proposés par l'ADEME dans son AEU⁴.

Le quartier de la Ravine Blanche est un des six quartiers retenus au titre de la programmation CUCS⁵ prévus pour la période 2007-2009 de la ville de Saint-Pierre, étendu à 2012. Le quartier est qualifié de Zone Urbaine Sensible (ZUS) ayant comme fonctionnalité de départ une logique unique : se loger. Au milieu des années 1960 et jusqu'à aujourd'hui, ce quartier a l'empreinte « d'habitat social » en raison de sa connotation sociale qui est restée très fortement marquée au fil des années. Le quartier est construit en grande partie sous forme d'immeubles collectifs ou de maisons individuelles en bandes. Le projet de rénovation urbaine s'est reposé sur la volonté de relier ce quartier prioritaire à la ville et au centre-ville.

4. Approche Environnementale de l'Urbanisme

5. Contrats urbains de cohésion sociale

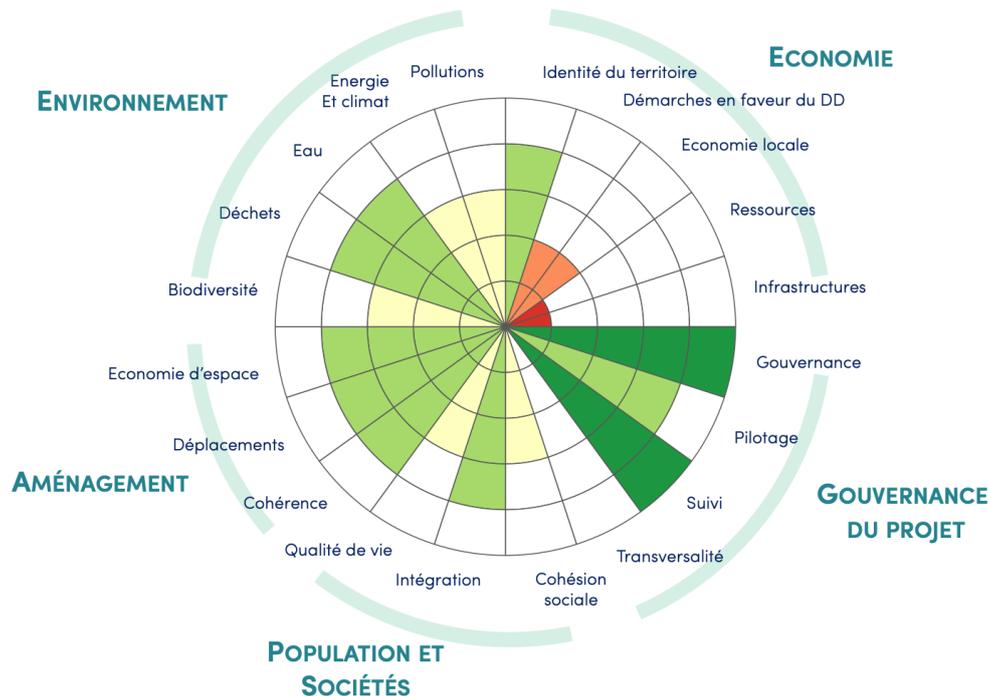


FIGURE 7.4 – Cercle du projet du projet de l'ANRU de Ravine Blanche, [Etienne 2017].

Faire de Ravine Blanche un quartier plus durable était, selon la Mairie de Saint-Pierre, de lui donner intrinsèquement des possibilités de mutation et de transformation de son image. La méthodologie décrite précédemment a permis la mise en place d'une base de données à partir d'une enquête menée auprès d'un échantillon de 42 habitants du quartier, d'un entretien avec le porteur du projet et des données de l'INSEE. Le cercle de soutenabilité, voir Figure 7.4, obtenu permet de décrire la durabilité de ce projet. On repère rapidement ses forces et ses faiblesses, grâce à la visualisation du niveau de durabilité des thématiques et des sous-thématiques. Ainsi, la soutenabilité de Ravine-Blanche semble élevée, avec l'aspect de la gouvernance très fortement présent, un point remarquable étant le suivi. L'un des points faibles concerne l'aspect économique. En effet l'objectif initial de reconnexion du quartier au centre-ville, a fait qu'il n'y a pas eu de mise de véritables services de proximité dans le quartier. Ainsi, les petits commerces ou autres activités existantes n'ont pas fait l'objet d'une intégration particulière dans les espaces bâtis ce qui explique l'évaluation relativement faible sur cet aspect. La notion de proximité de l'accès à des services est une attente forte des usagers dans les différentes enquêtes que nous avons menés dans divers quartiers de l'île. Parallèlement à ces travaux, nous avons mené une analyse complémentaire après projet sur les usages des habitants concernant les déplacements et la gestion des déchets [Praene 2017b]. L'étude a été effectuée sur la base d'une analyse exploratoire de données et d'enquêtes de terrain. Les analyses mettent ainsi en avant un paysage marqué majoritairement par l'utilisation de l'automobile et l'influence de facteur sociodémographique dans l'utilisation du TCSP bus, puisque ce sont majoritairement les foyers ne disposant pas d'un véhicule qui utilisent ce moyen de transport. Ce constat amène ainsi à se pencher sur d'autres facteurs sur lesquels

il serait possible d'agir pour séduire d'autres usagers et favoriser l'utilisation du TCSP. La question du coût voire de la gratuité du transport est aujourd'hui pensée comme potentiel facteur d'incitation à l'usage du TCSP. L'accent sur un lien entre agréabilité du quartier et utilisation des transports en commun pourrait aussi être objet d'étude. La population met en effet en avant les problèmes de congestions et le besoin de parkings supplémentaires ; le TCSP pourrait ainsi être présenté comme un moyen face à ces problèmes et souligner l'aspect agréable d'espace non congestionné et autres bénéfices associés. Du côté de l'environnement, les analyses mettent en avant la perception d'un quartier propre, dont la gestion environnementale est satisfaisante faisant du quartier un endroit agréable à vivre. Il ressort ainsi que les habitants se sentent investis dans la gestion des déchets dans le quartier et ceci semble être favorisé par une stratégie de communication entre la population et les acteurs, jugée satisfaisante. Néanmoins, les résultats soulignent une appréhension plus complexe de l'aménagement des dispositifs de tri, avec une ambivalence sur la satisfaction des habitants vis-à-vis des dispositifs. Il semble que l'espace d'aménagement soit l'un des déterminants de cette difficulté : à partir de quelle distance la population juge le dispositif satisfaisant : dans le logement ou dans le quartier à proximité ? Aujourd'hui, la réflexion sur l'accès au dispositif est d'autant plus importante qu'il s'agit d'un facteur déterminant des comportements de tri de la population.

7.5 Synthèse

Devant cette complexité des perceptions et des usages des espaces de nature, dans la conception des quartiers durables réunionnais, il s'avère nécessaire de saisir l'éventail des représentations pour mieux intégrer la nature dans le quotidien des habitants. Sans compréhension des préférences des utilisateurs locaux, les espaces peuvent ne pas répondre à leurs besoins et peuvent alors être sous-utilisés voire abandonnés. Dans le contexte réunionnais, plus que des stratégies de verdissement et d'agrément de l'espace, c'est une réelle réflexion sur la nature comme l'élément structurel principal de l'espace qui semble-t-il doit être menée. Au-delà des parcs, jardins ornementaux classiques et espaces verts, les représentations ici tendent vers une nature intégrée dans la quotidienneté. Pour reprendre les propos de [Zhang 2015] il s'agit de penser non plus en termes d'espaces verts (green space) mais de lieu vert (green place), ce qui suggère une intégration harmonieuse du quartier dans l'espace naturel, à l'échelle des constructions et plus largement à l'échelle du territoire quant aux interactions du quartier avec les espaces naturels environnants.

Le quartier réunionnais idéal se caractérise par des aspects fonctionnels intéressants à considérer pour l'élaboration des quartiers durables. Les enquêtés décrivent un quartier qui répond aux besoins dits " du quotidien " via les commerces d'alimentation générale et traditionnels (productions locales) et les services publics incluant la santé, le social, l'éducation et les loisirs. Les services de proximité sont des facteurs de qualité de vie car facilitant l'approvisionnement en produits et en services courants. La proximité et la mixité des fonctions caractérisent le type d'espace vers lequel tendent les aménageurs, car le mélange du résidentiel, du commercial et de l'institutionnel crée un espace dynamique sur le plan économique et viable sur le plan environnemental du fait d'un usage réduit

de l'automobile. Néanmoins, on note un attachement fort à l'aspect résidentiel et les représentations des enquêtés concourent à délimiter l'espace entre fonctions résidentielles et socio-économiques. Les habitants mettent en avant des problèmes perçus de cohabitation entre les habitations et les services, comme la perte de l'intimité et du calme, les problèmes de sécurité et de pollution dus à la concentration d'activités, de personnes et de la circulation. Ainsi nous voyons bien que produire la ville "durable" tropicale n'est pas un enjeu simple. Plusieurs éléments sont à l'heure actuelle en train d'être mis en place ou utiliser selon des réglementations. Mais il demeure toujours nécessaire de pouvoir comprendre et apprendre des différents projets passés. L'objectif n'étant pas d'uniformiser un modèle idéal de ville ou quartier durable tropical, mais de définir précisément les contours et critères auxquels on doit s'attacher pour espérer réussir le projet au regard de la population. Cette ambition se nourrit nécessairement d'une lecture croisée des acteurs, des outils à mobiliser, mais surtout d'une approche transdisciplinaire itérative qui devra mêler des champs aussi divers que l'urbanisme, la conception bioclimatique, la sociologie, l'architecture, etc.. Enfin il sera primordial de toujours avoir une démarche cohérente de diagnostic et de suivi de ces projets. Bien que cela peut sembler anodin, à ce jour par exemple le retour d'expérience sur les projets de renouvellement urbain est complexe. En effet, les diagnostics initiaux quand ils existent n'ont pas été définis selon une grille d'évaluation clairement établie. Cela rend par conséquent difficile, les évaluations post projet qui auraient du se faire à partir d'une situation de référence qui utilise le même corpus.

VALORISATION – 2 articles revue en évaluation, 5 communications. Les travaux menés ont reçus le financement de deux projets : TRANSEETER (Université de la Réunion) , MAR-RONER (Region FEDER).

ENCADREMENT – J'encadre 2 thèses Région FEDER à l'université de la Réunion - J'ai encadré un Post-Doc FEDER Amandine Junot-Payet sur ce thème. Le travail de terrain s'est effectué dans le cadre de 2 stages de Master 1 et 2. Une stagiaire de l'Université de Trèves a également participé aux travaux d'enquêtes sur la perception des habitants concernant les Enrs.

FORMATION – Une UE Diagnostic du territoire en Master 1 VEU, 1 formation à été effectué à destination des doctorants de l'IST d'Antananarivo en mars 2019, concernant le traitement des résultats d'enquête.

Approche prospective de la transition énergétique

Sommaire

8.1	Introduction	131
8.2	Consommation électrique de Madagascar	133
8.2.1	Méthodologie générale	134
8.2.2	Résultats et discussion	137
8.3	Scénarios par approche prospective	142
8.3.1	OSeMOSYS où l'interopérabilité et la flexibilité de la modélisation	143
8.3.2	Modèle OSeMOSYS pour la Réunion (SARI)	144
8.3.3	Modèle OSeMOSYS pour Madagascar (MAMBA)	148
8.4	Synthèse	152

LA prospective occupe aujourd'hui une place de choix dans les outils et méthodes mobilisées pour orienter les débats autour du changement climatique. Comme l'indique [Maïzi 2012], les prémices de la prospective ont été mise en oeuvre au service de la reconstruction de la France au sortir de la Seconde Guerre mondiale. Dans le groupe de travail ayant porté les *Réflexions pour 1985*, Pierre Massé propose une définition de la prospective comme "*un souhaitable qui apparaisse plausible à l'esprit prospectif et qui devienne probable pour l'esprit attaché à sa réalisation*" [Massé 1964]. Nous aborderons dans ce chapitre les récents travaux que nous avons menés depuis deux ans dans ce domaine. Après un bref rappel sur les différents aspects entourant la prospective et un focus sur la situation particulière des îles, nous verrons ainsi le diagnostic énergétique des territoires afin de comprendre les contraintes passées. Puis nous verrons comment faire les enjeux énergétiques et les externalités (volatilité des prix, émissions de GES, cout de l'énergie, etc.).

8.1 Introduction

La prospective se propose de construire des futurs possibles, c'est-à-dire construire le futur en envisageant différents scénarios. Cette discipline s'est largement développée en France

depuis plus de 50 ans. Cette démarche peut être plutôt *quantitative* en mobilisant des environnements de modélisation des scénarios ou faire interagir plusieurs disciplinaires dans une approche plus *qualitative*. Ainsi la prospective se mêle avec la planification. Dans le premier cas, l'attention est mise sur les choix à effectuer dès à présent en fonction des "différents" futurs envisagés. Dans le second cas, elle va définir les moyens et la feuille nécessaires à la réussite des objectifs qu'aura fixés la démarche prospective. La connexion entre la prospective et la planification est obligatoire et doit s'envisager de façon itérative. En effet, partant de l'analyse d'une situation initiale (présente ou passée), la planification va s'interroger sur les ambitions portées par la prospective au regard des changements qu'ils vont induire sur la société, l'environnement, l'Homme, etc. Ainsi comme, le dit [De Jouvenel 1999], la prospective n'est donc pas un outil prophétique qui impose un futur, mais qui nous aide à le bâtir. Ainsi, comme le disait l'un des fondateurs de cette attitude, "« *l'esprit prospectif ne prédétermine pas, il éclaire*". On peut résumer l'approche globale de la démarche prospective de la manière suivante, Dans le domaine de la prospective quantitative, la modélisation repose sur

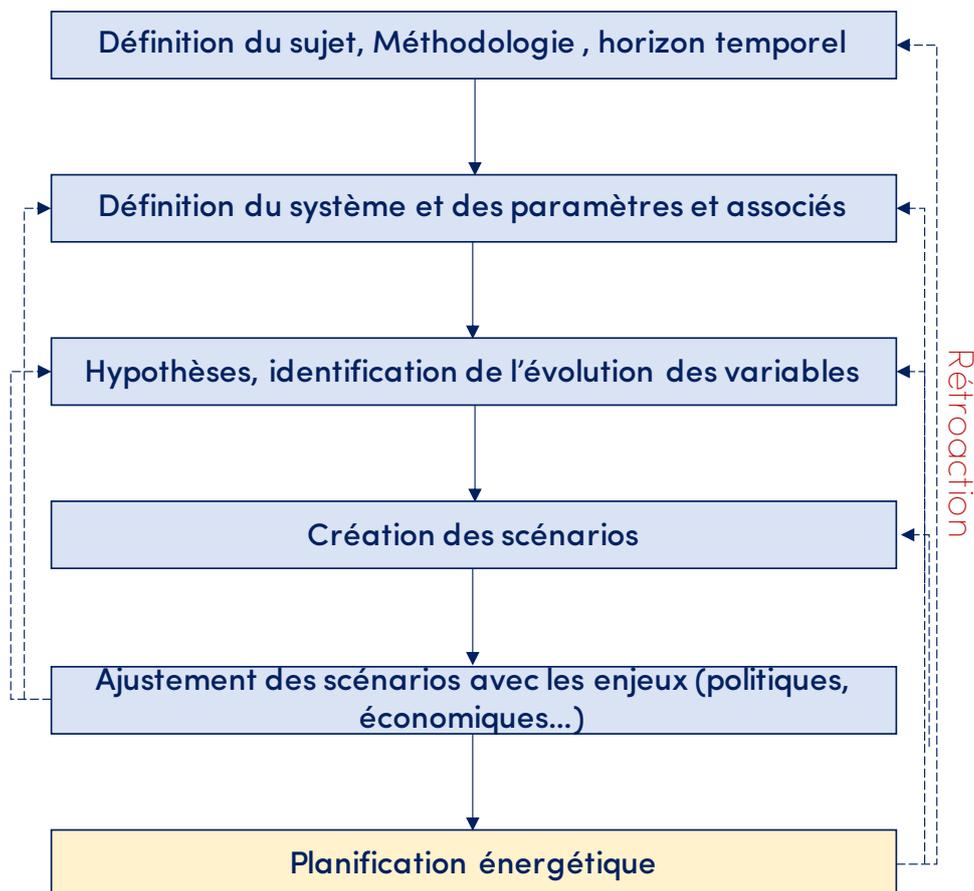


FIGURE 8.1 – Processus de l'approche prospective – adapté de [Julien 1975].

deux grandes approches dont la philosophie diffère grandement :

- les modèles "**top-down**" | où on se place dès le départ sous le prisme d'une **straté-**

- gie.** L'objectif énergétique est alors considéré comme une contrainte placée au plus au niveau hiérarchique. Et on s'attache à définir les corrélations avec les branches inférieures de cet arbre hiérarchique. L'objectif est ainsi une décision qui trouve une déclinaison dans une forme ou une autre auprès de tous les acteurs de la transition énergétique ;
- les modèles "**bottom-up**" | où on est là dans la construction d'un modèle à partir de l'ensemble des paramètres du système. On se place ici plus dans le cas d'un **processus**. Cela permet alors d'avoir une représentation complexe de la production électrique. Cela permet de développer des problématiques d'optimisation des réseaux, de la production et de la demande.

Nous avons ainsi résumé dans les deux paragraphes suivants deux approches et résultats menés récemment sur le cas de Madagascar et de la Réunion. La première s'intéresse en une approche couplée de la LMDI et de l'analyse de sensibilité qui nous permet de comprendre le passé et de dégager des tendances pour le futur de Madagascar. Le second repose sur la mise en place d'une approche prospective pour construire des scénarios pour la Réunion à partir du logiciel OSEMOSYS.

8.2 Consommation électrique de Madagascar

Madagascar est particulièrement soumise aux chocs des prix de l'énergie et aux perturbations successives de l'approvisionnement en énergie. Comme de nombreux territoires isolés [Raghoo 2018], cette situation est principalement due à la forte dépendance de Madagascar à l'égard des combustibles fossiles importés pour la production d'électricité. Pour remédier à cette situation, l'État malgache a mis en place, depuis le 4 août 2015, une nouvelle politique énergétique appelée NPE¹ qui se concentre sur cinq objectifs : l'accès de tous aux nouvelles énergies, l'accessibilité des prix, la qualité et la fiabilité des services, la sécurité énergétique et la durabilité. Au départ, la vision 2030 visait deux objectifs principaux qui sont :

- Augmenter le taux d'accès des ménages à l'électricité à 70% en 2030 ;
- Remplacer progressivement les centrales thermiques existantes par des centrales d'énergie renouvelable.

La réalisation de ces objectifs dépend de stratégies spécifiques de planification énergétique qui intègrent toutes les caractéristiques de la situation énergétique de Madagascar. La production étant étroitement corrélée à la demande, la compréhension de la consommation reste essentielle pour l'analyse de la situation énergétique d'un territoire. À notre connaissance, seules trois études ont examiné le secteur de l'électricité et les opportunités de développement des énergies renouvelables à Madagascar [Praene 2017a, Trotter 2017, Surroop 2018a]. Compte tenu des objectifs du gouvernement malgache, il est important d'analyser les paramètres qui ont influencé de manière significative l'évolution de la consommation d'électricité à Madagascar sur la période 1987-2015. Nos travaux se concentrent donc dans un premier temps sur une analyse historique pour aider à mettre en œuvre une vision prospective du

1. Nouvelle Politique de l'Énergie pour l'horizon 2030

secteur de l'électricité du pays. Ensuite, il s'agit d'identifier les facteurs qui influencent ces changements. Enfin, nous avons tenté de déterminer quels sont les facteurs qui agissent sur les différents «effets» ?

Sur la base d'études précédentes, ce document applique la méthode IDA² qui a été largement utilisée dans la décomposition de la consommation d'électricité. La méthodologie appliquée dans cet article est basée sur une décomposition de la LMDI³, qui sera combinée avec une analyse de sensibilité (SA) basée sur la méthode EFAST et la régression linéaire. L'idée générale est de proposer un modèle régressif pour définir une première analyse prospective pour Madagascar. Notre travail est le premier de la littérature à examiner la structure de l'électricité et l'évolution des tendances en combinant la SA et la LMDI. Les résultats seront particulièrement utiles pour fournir une vue d'ensemble et identifier les forces motrices du futur paysage énergétique de Madagascar. Sur la base de ces résultats, les implications politiques et les perspectives d'une production d'électricité plus durable en développant davantage d'énergies renouvelables sont examinées.

8.2.1 Méthodologie générale

À Madagascar, les consommateurs d'électricité se répartissent en quatre secteurs : résidentiel, industriel, PME/services et éclairage public. La décomposition a utilisé ces quatre secteurs comme "catégories". Le secteur résidentiel est noté par "R", le secteur industriel par "I", les PME/services par "SME" et l'éclairage public par "PL". Le nombre de consommateurs et la consommation d'électricité de chaque secteur de 1987 à 2015 sont utilisés comme intrants pour l'analyse. L'analyse de la décomposition est utilisée par de nombreux analystes de l'énergie pour quantifier la contribution de différents facteurs dans l'évolution des indicateurs énergétiques [Zhang 2013, Baležentis 2011, Wang 2010, Kim 2017, Achão 2009] et environnementaux [Xu 2012, Xu 2014, Guan 2018, Marangoni 2017] au fil du temps. Elle aide à comprendre les facteurs de la consommation d'énergie et à mesurer et contrôler les performances des politiques liées à l'énergie [Ang 1998, Chen 2020b]. Les méthodes de décomposition les plus utilisées sont celles basées sur l'"indice de Laspeyres" et l'"indice de Divisia". Toutefois, en 1998, Ang et al. ont mis en évidence un problème important lié à ces méthodes : les valeurs résiduelles de décomposition. Ils ont donc proposé la méthode LMDI, qui est basée sur l'indice de division et la moyenne logarithmique [Ang 1998, Ang 2001, Ang 2007]. L'un des principaux avantages de la méthode LMDI par rapport à d'autres méthodes de décomposition largement utilisées est que la méthode LMDI ne laisse aucun résidu, ce qui, dans d'autres méthodes, peut être significatif et affecter les résultats et leur interprétation [Ang 2004]. Il s'agit d'une décomposition exacte. En conséquence, l'indice LMDI est devenu un outil largement utilisé pour analyser la situation énergétique et les problèmes environnementaux en raison de ses avantages supérieurs et de sa bonne adaptabilité dans les applications [Zhao 2010]. Notre méthodologie générale a été décrite dans la Figure 8.2.

Afin de simplifier la lecture de la décomposition, nous détaillons ici quelques éléments de description des paramètres utilisés.

2. Index Decomposition Analysis

3. Logarithmic mean Divisia index

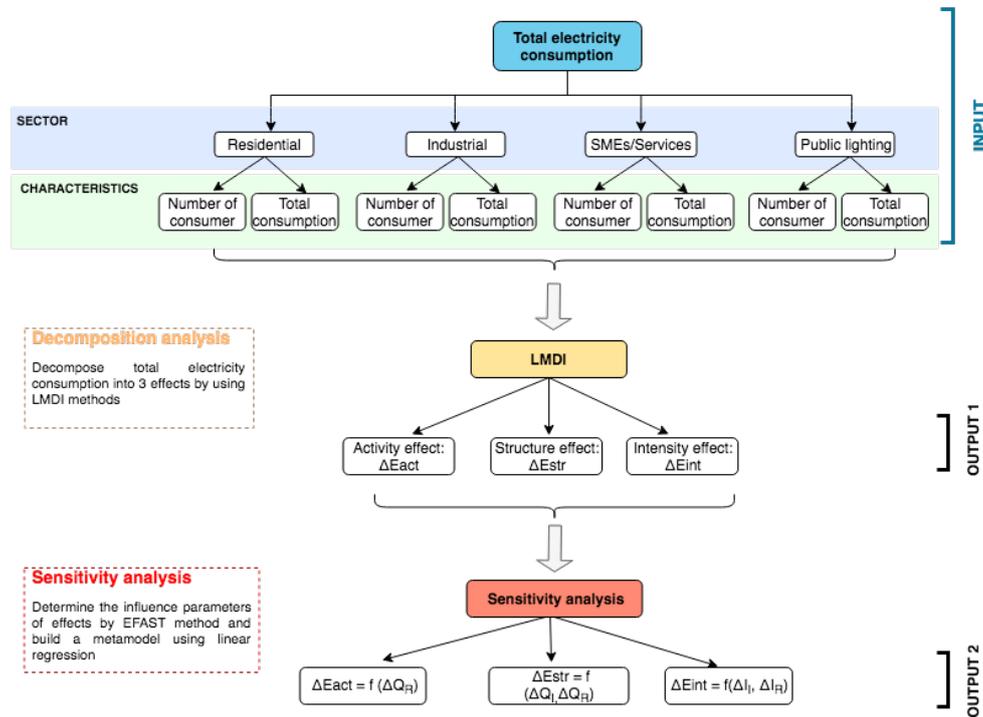


FIGURE 8.2 – Methodology framework

NOMENCLATURE

E | Consommation d'électricité.

Q | Nombre d'abonnés.

I | Intensité énergétique exprimé en consommation/abonné.

S | Part d'abonnées par secteur.

 ΔE_{act} | Effet d'activité. ΔE_{int} | Effet d'intensité. ΔE_{str} | Effet structurel.

Ainsi, on procède de la manière suivante :

- Application de la décomposition LMDI à la consommation d'électricité. Les données saisies caractérisent de chaque secteur. En conséquence, nous obtenons les 3 effets différents qui influencent la variation de la consommation d'électricité : effet d'activité ΔE_{act} , effet de structure ΔE_{str} , et effet d'intensité ΔE_{int} .
- Application de l'analyse de sensibilité combinée à une régression linéaire. Une régression linéaire est appliquée à chaque effet en fonction de la variation du nombre de consommateurs (ΔQ_i) et de la consommation d'électricité par consommateur (ΔI_i) de chaque secteur. L'objectif est de transformer l'expression des trois effets en un modèle linéaire qui intègre simultanément ΔQ_i et ΔI_i . Ensuite, nous effectuons une analyse de sensibilité des modèles obtenus afin de déterminer les paramètres d'influence de

chaque effet. Enfin, nous effectuons une régression linéaire de chaque effet sur la base des paramètres les plus influents. Les métamodèles obtenus (sortie 2) sont les suivants :

$\Delta E_{act} = f(\Delta Q_R)$: effet d'activité exprimé en fonction du nombre de consommateurs dans le secteur résidentiel.

$\Delta E_{str} = f(\Delta Q_I, \Delta Q_R)$: effet structurel exprimé en fonction du nombre de consommateurs dans les secteurs industriel et résidentiel.

$\Delta E_{int} = f(\Delta I_I, \Delta I_R)$: effet d'intensité exprimé en fonction de la consommation d'électricité par consommateur dans les secteurs industriel et résidentiel.

Concernant la méthode LMDI, nous rappelons ici simplement le cadre général de la décomposition et mettrons en exergue l'innovation qu'a apporté nos travaux. Ces méthodes orientées diagnostic initialement, peuvent aujourd'hui selon notre approche s'entrevoir dans une logique de prospective. Soit E la consommation totale d'énergie. Les différentes catégories de secteurs sont représentées par l'indice i , et le temps de référence est représenté par j . La variation de E sera quantifiée en évaluant les impacts des effets suivants :

- effet d'activité, désigné par Q ;
- effet structurel représenté par S : $S_i = Q_i/Q$;
- effet d'intensité, désigné par I : $I_i = E_i/Q_i$.

Si l'on considère les premiers travaux de [Ang 2005, Ang 2015], le LMDI est décrit par les équations suivantes :

$$E = \sum_i E_i = \sum_i Q \frac{Q_i}{Q} \frac{E_i}{Q_i} = \sum_i Q S_i I_i \quad (8.1)$$

Ainsi, la décomposition additive se présente sous la forme suivante :

$$\Delta E_{tot} = E^T - E^0 = \Delta E_{act} + \Delta E_{str} + \Delta E_{int} \quad (8.2)$$

$$\Delta E_{act} = \sum_i \frac{E_i^T - E_i^0}{\ln E_i^T - \ln E_i^0} \ln\left(\frac{Q^T}{Q^0}\right) \quad (8.3)$$

$$\Delta E_{str} = \sum_i \frac{E_i^T - E_i^0}{\ln E_i^T - \ln E_i^0} \ln\left(\frac{S_i^T}{S_i^0}\right) \quad (8.4)$$

$$\Delta E_{int} = \sum_i \frac{E_i^T - E_i^0}{\ln E_i^T - \ln E_i^0} \ln\left(\frac{I_i^T}{I_i^0}\right) \quad (8.5)$$

La formule multiplicative s'écrit :

$$D_{tot} = \frac{E^T}{E^0} = D_{act} D_{str} D_{int} \quad (8.6)$$

$$D_{act} = \exp\left(\sum_i \frac{(E_i^T - E_i^0)/(\ln E_i^T - \ln E_i^0)}{(E^T - E^0)/(\ln E^T - \ln E^0)} \ln\left(\frac{Q^T}{Q^0}\right)\right) \quad (8.7)$$

$$D_{str} = \exp\left(\sum_i \frac{(E_i^T - E_i^0)/(\ln E_i^T - \ln E_i^0)}{(E^T - E^0)/(\ln E^T - \ln E^0)} \ln\left(\frac{S_i^T}{S_i^0}\right)\right) \quad (8.8)$$

$$D_{int} = \exp\left(\sum_i \frac{(E_i^T - E_i^0)/(\ln E_i^T - \ln E_i^0)}{(E^T - E^0)/(\ln E^T - \ln E^0)} \ln\left(\frac{I_i^T}{I_i^0}\right)\right) \quad (8.9)$$

L'analyse de sensibilité consiste à étudier les effets du changement d'une variable sur les autres variables et surtout sur les résultats finaux [Faivre 2013]. Elle nous permet de simplifier et de mieux comprendre un modèle en orientant l'attention vers des modules spécifiques influents. En outre, elle peut valider un modèle et aider à mettre en place de futures expériences. Différentes méthodes d'analyse de sensibilité ont été développées, parmi lesquelles des méthodes différentielles [Lomas 1992], des méthodes de criblage telles que la méthode Morris [Morris 1991b], et des méthodes basées sur l'analyse de la variance telle que les méthodes FAST (Fourier amplitude sensitivity test) et EFAST (extended Fourier amplitude sensitivity test) [Saltelli 1999, Saltelli 2000, Sobol 1993]. Dans cette étude, l'analyse sera effectuée à l'aide de la méthode EFAST. Cette méthode calcule l'indice de sensibilité du premier ordre (S_i) et l'indice d'ordre total (S_{Ti}) en utilisant le même ensemble d'échantillons. Ces indices de sensibilité sont exprimés en fonction de l'espérance (E) et de la variance (V) d'une sortie Y (X_1, X_2, \dots, X_k) :

$$S_i = \frac{V[E(Y | X_s)]}{V(Y)} \quad (8.10)$$

$$S_{Ti} = \frac{E[V(Y | X_{\sim i})] - V[E(Y | X_{\sim i})]}{V(Y)} \quad (8.11)$$

où,

- S_i : contribution de l'effet principal du facteur d'entrée i^{th} à la valeur de sortie.
- S_{Ti} : contribution de l'effet du facteur i^{th} à la valeur de sortie en tenant compte de ses interactions avec les autres facteurs du modèle.

La méthode classique FAST a été introduite dans les années 1970 pour calculer uniquement les indices de sensibilité de premier ordre. Plus tard, Saltelli et al. l'ont améliorée pour en faire la méthode EFAST, qui est également capable de calculer des indices d'ordre supérieur et des indices totaux. Le principe de la méthode FAST est d'associer à chaque facteur une fréquence w_i et de générer des valeurs selon la fonction :

$$X_i = G_i(\sin(\omega_i s)) \quad (8.12)$$

Il est également recommandé transformé $X_i = G_i(\sin(\omega_i s))$. Il est dès lors possible d'étendre le modèle à une série de Fourier selon :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) = f(s) = A_0 + \sum_{j=1}^{\infty} (A_j \cos(j s) + B_j \sin(j s)) \quad (8.13)$$

8.2.2 Résultats et discussion

Les résultats de la décomposition additive avec la référence glissante sont présentés dans la Figure 8.3. La Figure 8.4 montre les résultats de la décomposition additive avec une année de référence fixe (1987). Nous avons choisi de décomposer selon une année de référence fixe afin de pouvoir suivre les changements structurels de la consommation

d'électricité ainsi que d'en extraire les tendances générales. Nous pouvons ainsi obtenir un résultat intéressant ; d'une part, des informations de type tendanciel comme dans les séries chronologiques et, d'autre part, des informations annuelles sur la répartition des différents effets.

L'effet d'activité mesure l'impact des changements du nombre d'abonnés sur la consommation d'électricité. L'effet structurel mesure le changement de composition. L'effet d'intensité évalue la progression de l'intensité énergétique, qui est exprimée par la consommation d'électricité par abonné.

Selon la figure 8.3, les changements dans la consommation totale d'électricité (effet total)

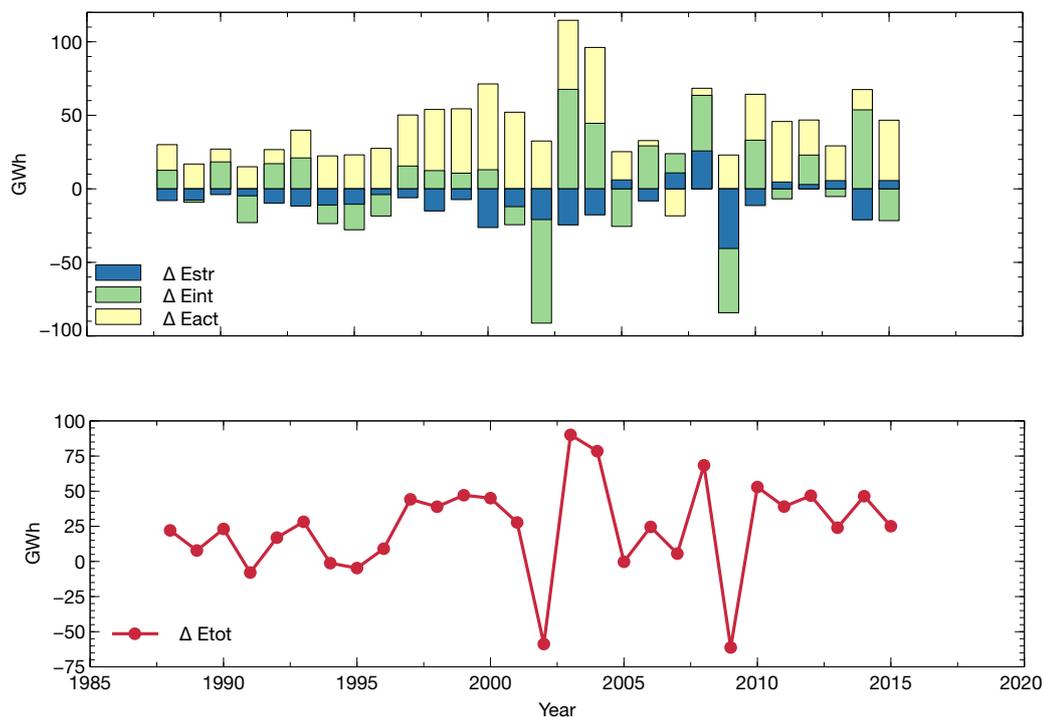


FIGURE 8.3 – Décomposition additive de la consommation électrique à Madagascar de 1987 à 2015.

sont généralement discontinus et irréguliers, et la tendance est variable. Un pic négatif a été observé entre 1990 et 1991, suivi d'un pic positif en 1992-93. La variation a diminué entre 1994 et 1995. Cette baisse a été suivie d'une augmentation au cours de la période 1995-96, qui a stagné entre 1997 et 2000.

Ensuite, entre 2000 et 2010, il y a eu une phase d'instabilité dans la variation de la consommation d'électricité de Madagascar. Deux pics négatifs sont mis en évidence en 2001-2002 et 2008-2009, qui correspondent tous deux à une période où le pays a été plongé dans une crise politique.

L'évolution du nombre d'abonnés n'a pas d'influence significative sur la consommation annuelle d'électricité (année par année); voir figure 8.3. Cependant, comme on peut

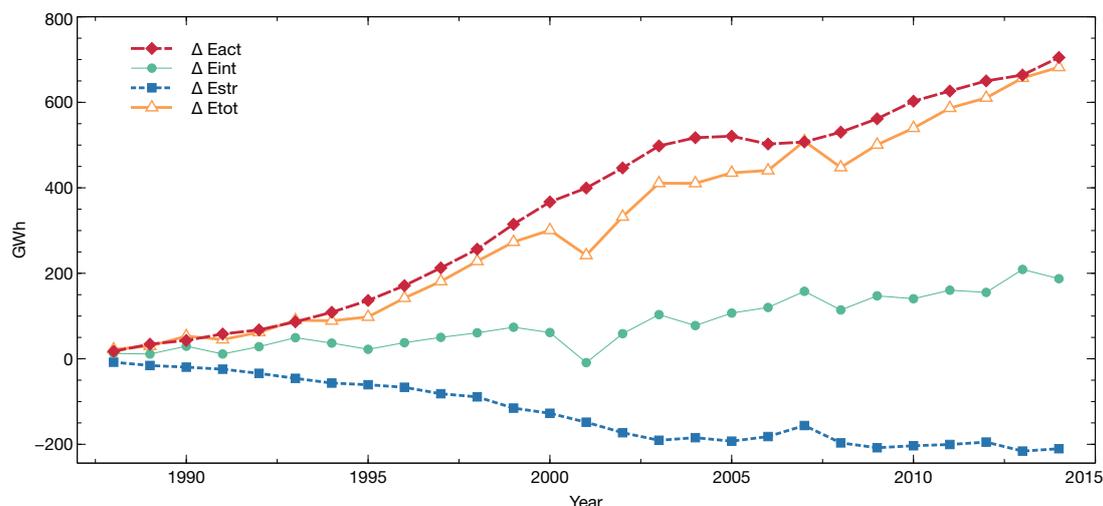


FIGURE 8.4 – Décomposition à partir de l'année de référence 1987

l'observer dans la figure 8.4, la tendance à la hausse de la consommation d'électricité (ligne orange) est étroitement liée à l'évolution du nombre d'abonnés (ligne rouge).

Concernant l'effet d'intensité, son évolution annuelle est similaire à celle de l'effet total (figure 8.3), mais son évolution de 1987 à 2015 est globalement stagnante (figure 8.4). Ainsi, l'évolution de la consommation d'électricité de Madagascar est principalement due à des changements dans le nombre d'abonnés, mais des augmentations ou des diminutions significatives peuvent s'expliquer par des changements dans l'intensité énergétique. L'effet de structure est stagnant. De 1987 à 2015, la répartition du nombre d'abonnés dans chaque secteur n'a pas modifié l'évolution de la consommation d'électricité. Compte tenu de la dynamique de variation des différents effets, il est possible de mettre en relation le contexte sociopolitique du pays et la variation de sa consommation d'électricité. En effet, chaque pic négatif significatif correspond à une crise sociopolitique. Chaque période de baisse est alors généralement suivie d'une augmentation significative, qui correspond à la stabilisation de la situation économique du pays après la fin de la crise.

LECTURE HISTORIQUE

1990-1991 : La consommation d'électricité a diminué de 1,97% (-7,92 GWh). L'effet d'intensité (ΔE_{int}) est le principal facteur de cette diminution (-18,2 GWh ou -4,54%), soutenu par l'effet de structure (-4,74 GWh ou -1,18%), tandis que l'effet d'activité contribue positivement (+15 GWh ou + 3,75%). Cette période est caractérisée par une série de manifestations visant à l'abrogation de la Constitution socialiste de 1975 et à la destitution du Président Didier Ratsiraka.

1991-1993 : Cette période est marquée par l'influence positive de l'effet d'activité (ΔE_{act}) et l'effet d'intensité sur la consommation totale d'électricité malgré la contribution négative de l'effet structurel (ΔE_{str}). Cette augmentation est liée au retour du

calme à Madagascar après la crise politique de 1991. La Haute Autorité de l'État (HAE) a adopté une nouvelle politique de gestion des entreprises publiques : la privatisation de plusieurs entreprises publiques. Cela a conduit à l'arrivée de nombreux investisseurs et au développement de zones de libre-échange dans la capitale de l'île.

1994-1995 : La baisse est de 1,08% (-4,73 GWh). L'effet d'intensité ΔE_{int} est de -12,60 GWh (-2,88%), et l'effet structurel ΔE_{str} est de -11 GWh (-2,40%). Cependant, l'effet d'activité ΔE_{act} est positif, avec une valeur de +22,4 GWh (+5,11%). Cette période est marquée par le passage du cyclone Geralda (février 1994), qui a fortement touché Madagascar ; au total, plus de 40.000 maisons ont été détruites et 356.000 personnes ont été touchées. Le cyclone a fait 231 morts et causé plus de 10 millions de dollars (USD 1994) de dégâts.

2001-2002 : La variation totale ΔE_{tot} est de -9,12% (-58,8 GWh), causée par un effet d'intensité ΔE_{int} de -70,4 GWh (-10,93%), un effet de structure ΔE_{str} de -20,9 GWh (-3,24%), et un effet d'activité ΔE_{act} de +32,5 GWh (+ 5,05%). La diminution sur cette période est dix fois plus importante que celle de 1994-95, notamment la diminution due à l'effet d'intensité. En effet, la crise post-électorale de 2001-2002 a eu de graves conséquences pour le pays, car les barrages routiers visant à isoler la capitale ont entraîné une pénurie de carburant dans la province d'Antananarivo, ce qui a entraîné des problèmes de production d'électricité de la JIRAMA. En outre, de nombreuses entreprises de la "zone de libre-échange" dont les activités étaient axées sur l'exportation de produits ont dû fermer leurs portes parce que la crise n'était pas propice aux exportations. En conséquence, le pays a connu un déclin important de l'activité économique et industrielle, reflétant une baisse du nombre d'abonnés industriels de la JIRAMA et une diminution de la consommation des abonnés. À cela s'est ajoutée l'inflation.

2002-2003 : En un an, on peut constater la reprise de la consommation d'électricité à Madagascar après une période de déclin. Cela se traduit par une variation totale de 90,1 GWh, soit 15% par rapport à l'année précédente. Le nouveau boom a été fortement influencé par l'effet d'intensité et l'effet d'activité, malgré un effet structurel négatif. La fin du premier semestre 2002 a marqué une nouvelle ère pour Madagascar. Un nouveau président a été officiellement proclamé et investi. Vers la fin de cette même année, la reprise économique a été discutée. Madagascar a été réintégré dans l'Organisation de l'Union Africaine ; en outre, le nouveau président s'est engagé dans une politique de privatisation et d'ouverture aux capitaux étrangers, qui a porté ses fruits car l'économie malgache a connu une croissance. Le marché de l'exportation a donc été relancé.

2008-2009 : La variation totale est de -7,19% (-61,2 GWh), causée par un effet d'intensité de -43,7 GWh (-5,12%), un effet de structure de -40,6 GWh (-4,76%), et un effet d'activité de +23 GWh (+2,70%). La crise politique qui a éclaté en janvier 2009 lorsque Andry Rajoelina (alors maire d'Antananarivo, la capitale) a pris le pouvoir et que cela a stoppé la croissance économique du pays ; ce qui a entraîné une baisse du PIB, des revenus et de l'inflation et une augmentation du chômage. En d'autres termes, les indicateurs économiques et sociaux étaient en baisse.

2010-2015 : Aucun changement significatif n'est observé dans la variation de la consommation d'électricité. Cela coïncide avec la stabilité économique et politique

du pays après avoir connu la crise de 2009. Fin janvier 2009, A. Rajoelina a mis en place une Haute Autorité de Transition (HTA), dont il a pris la tête. Ce qui était censé n'être qu'un gouvernement de transition, s'est en fait maintenu jusqu'en 2015. Cependant, la poursuite de ce régime n'a pu se faire qu'au prix de plusieurs remaniements ministériels et de l'absence d'opposition politique. En 2011, une feuille de route a été signée pour sortir de cette situation. Le retrait de l'aide internationale dans le pays place celui-ci dans une situation économique critique, poussant les autorités à exploiter des ressources essentielles telles que le bois de rose. L'incertitude qui entoure la pseudo-stabilité de la période de transition entrave également l'investissement et le développement du secteur industriel.

Cette lecture historique nous a ainsi permis d'interpréter les résultats de LMDI au-delà uniquement des chiffres, en les faisant coïncider avec une réalité du pays. Cette étape apporte en quelque sorte des éléments de validation à notre analyse. À la suite de cette analyse nous avons effectué l'analyse de sensibilité. C'est en ce sens, que notre approche est innovante. En effet, les travaux issus de la littérature s'arrêtent à l'interprétation des différents effets et à leur impact sur la variable observée. Ainsi le recours à l'analyse de sensibilité nous a permis de construire des métamodèles représentant les effets, à partir des variables intensité, nombre d'abonnés, etc. On obtient alors le jeu d'équations suivants :

$$\Delta E_{act} = 1.562 + 1.975 \times 10^{-3} \times \Delta Q_R \quad (8.14)$$

$$\Delta E_{int} = -5.984 \times 10^{-1} + 8.522 \times 10^2 \times \Delta I_I + 4.188 \times 10^5 \times \Delta I_R \quad (8.15)$$

$$\Delta E_{str} = -2.336 + 3.307 \times 10^{-1} \times \Delta Q_I - 8.417 \times 10^{-4} \times \Delta Q_R \quad (8.16)$$

Grâce à ces métamodèles, il est possible des trajectoires qui ne soit pas uniquement des scénarios de type Business-as-usual (BAU). Par conséquent, nous avons pu traduire à travers les modèles ambitions politiques afin de voir déterminer quels pourraient être les besoins et la structure de la demande en énergie. Nous avons ainsi implémenté les ambitions politiques portées par les différents gouvernements malgaches.

Finalement, afin de concevoir la feuille de route pour la transformation énergétique de Madagascar, il sera essentiel de pouvoir intégrer tous les effets et variables abordés dans ce travail, afin de considérer les différents objectifs intermédiaires à atteindre à moyen terme. Les résultats suggèrent une orientation stratégique forte pour la politique énergétique nationale. Madagascar n'ayant pas encore achevé sa transition démographique, deux défis doivent être relevés par les acteurs du système énergétique : la décarbonisation du mix et la satisfaction d'une demande énergétique croissante. Le pays doit donc décarboniser sa croissance et sécuriser sa production d'électricité. En effet, la stabilité politique est l'un des éléments clés de la résilience et de la durabilité du pays au cours des vingt prochaines années. Les effets négatifs de ces instabilités ne sont pas très prononcés en raison du faible nombre d'abonnés dans le pays. Par conséquent, comment mettre en œuvre une transition vers un accès sécurisé à l'électricité. Le gouvernement malgache doit encourager les investissements visant à décarboniser son mix électrique. Cela permettra de limiter sa vulnérabilité aux importations de ressources fossiles. Compte tenu des effets d'intensité et d'activité, le développement économique entrainera une augmentation des effets.

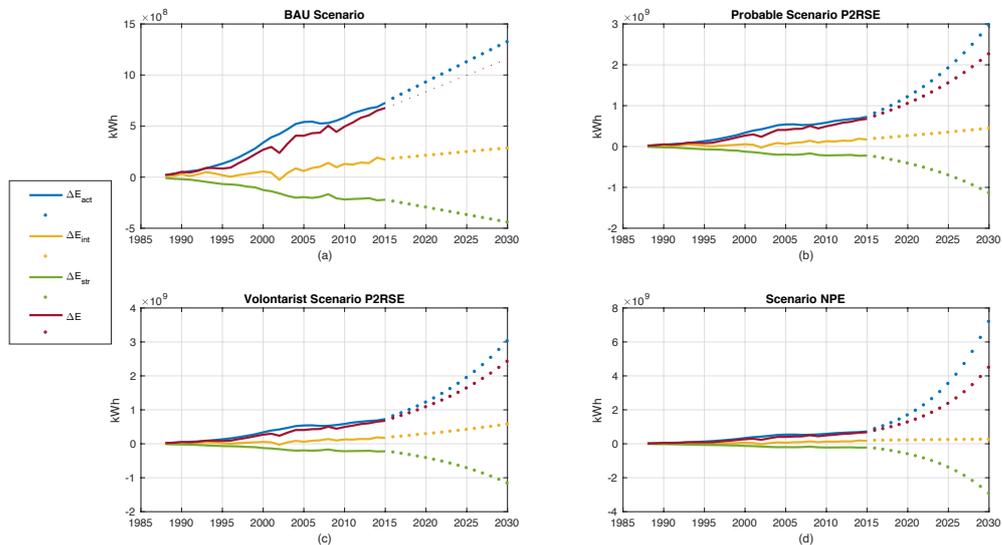


FIGURE 8.5 – Production électrique selon tous les scénarios pour 2030.

Ainsi, le gouvernement doit promouvoir les équipements à faible intensité énergétique dans les ménages, mais aussi réfléchir à une stratégie globale (par l'information, l'éducation) pour limiter la demande en électricité. Enfin, compte tenu de la situation sociale de la population, les ménages malgaches ne peuvent assumer seuls cette décarbonisation de la consommation d'énergie. Il sera essentiel pour le gouvernement de trouver les mécanismes financiers pour soutenir les ménages dans leur transition.

8.3 Scénarios par approche prospective

La planification de scénarios stimule la réflexion stratégique et aide à surmonter les limites de la pensée en créant de multiples futurs possibles. Jebaraj et Iniyar [Jebaraj 2006] ont présenté une revue de littérature sur la façon dont les modèles de planification énergétique ont évolué chronologiquement. Ils peuvent être classifiés en trois catégories : les modèles économétriques, les modèles de simulation, les modèles d'optimisation. Chaque catégorie de méthodes vise à développer des modèles de demande d'énergie, des modèles d'approvisionnement d'énergie ou bien des modèles intégrés d'offre et de demande d'énergie.

Le choix de la méthodologie à appliquer dépend notamment des caractéristiques du système énergétique à modéliser, des contraintes à intégrer et des résultats attendus. En outre, pour gérer cette phase de modélisation, divers outils logiciels ont été mis en place. Connolly et al.

[Connolly 2010] ont examiné 37 outils assistés par ordinateur pouvant être utilisés pour l'intégration des énergies renouvelables. Il ressort de leur étude qu'il n'existe pas d'outil énergétique qui traite tous les problèmes liés à l'intégration des énergies renouvelables, mais que l'outil énergétique « idéal » dépend fortement des objectifs spécifiques à atteindre. Par exemple, pour des planifications à court terme avec des pas de temps d'une heure ou moins, il est recommandé d'utiliser EnergyPLAN, Mesap PlaNet, H2RES et SimREN. Pour des pas de temps annuels, Inox, INFORSE seraient plus préférables.

Une équipe de chercheurs de l'université de KTH ont développé un modèle open-source d'optimisation de systèmes à part entière pour la planification énergétique à long terme, nommé OSeMOSYS. Depuis sa publication, OSeMOSYS a été largement utilisé pour l'élaboration de scénarios énergétiques à moyen et long terme dans de nombreuses études et applications. Cet environnement se couple à présent à d'autres en outils tel que LEAP⁴

8.3.1 OSeMOSYS où l'interopérabilité et la flexibilité de la modélisation

OSeMOSYS (*Open Source energy MOdelling SYStem*), est un "framework" de modélisation énergétique open source disponible en Python, GAMS et GNU MathProg. Il fonctionne avec 2 fichiers : le " fichier de modèles énergétiques " qui contient les données d'entrée définies par l'utilisateur pour spécifier le système énergétique ; et le "code file" qui contient les équations mathématiques pour spécifier le problème d'optimisation linéaire. Ces fichiers sont facilement personnalisables afin de répondre aux besoins d'une analyse particulière. Les fichiers de modèles énergétiques peuvent être générés soit par Python soit par l'interface graphique MoManI ou manuellement via un texte éditeur.

Le fichier code existe en deux types : la version longue (long code) et la version courte (short code). Le « long code » est caractérisé par une description mathématique détaillée, qui donne lieu à de nombreuses équations linéaires intermédiaires qui doivent être construites et calculées. Le « short code » réduit le nombre d'équations intermédiaires construites et calculées en combinant plusieurs équations en une seule pour améliorer les performances au détriment de la lisibilité du code [Howells 2011]. Les formulations mathématiques du cadre sont constituées de sets, de paramètres et de variables qui sont structurés en blocs thématiques. Chaque équation est modifiable et personnalisable. [Howells 2011, Gardumi 2018, Howells 2011] fournissent une description détaillée d'OSeMOSYS, de sa structure et des équations mathématiques qui composent le code.

L'intérêt majeur de OSeMOSYS est la flexibilité et la facilité de modification du code de base, qui laissent ainsi toute l'attitude pour aller au-delà de la configuration initiale du logiciel. Finalement, aujourd'hui on prend en compte des aspects sociaux, la variabilité de la production, la modernisation des structures de production, les contraintes foncières en matière de déploiement des Enrs, ou encore la qualité des réseaux distribution, etc..

Dans les sections suivantes, nous allons illustrer les premiers travaux que je mène actuellement dans le cadre de cette démarche prospective. Ainsi, nous aborderons dans un premier temps le cas du modèle que je développe pour la Réunion, un second modèle actuellement

4. Long-range Energy Alternatives Planning system

en développement dans la thèse de RASAMOELINA Miangaly sur le cas de Madagascar.

8.3.2 Modèle OSeMOSYS pour la Réunion (SARI)

▼SARI – openSource model bAse for Reunion Island

La structure du modèle a été élaborée en tenant compte de la structure de la demande, des technologies de production d'électricité et de leurs aspects économiques, techniques et environnementaux associés. Ainsi, trois scénarios ont été créés, à savoir le scénario "Business As Usual" (BAU), le scénario 1 et le scénario 2, voir Figure 8.6 : La mise en oeuvre d'OSeMO-

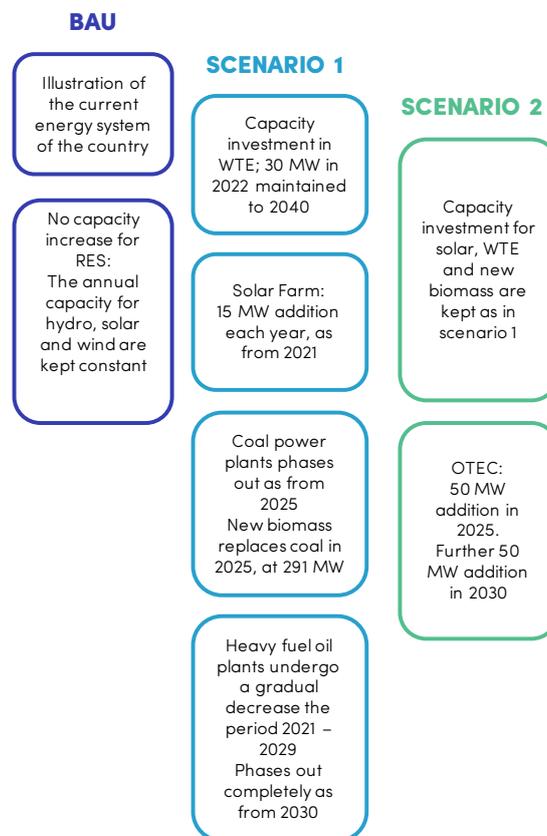


FIGURE 8.6 – Différents scénarios définis pour la Réunion.

SYS nécessite des variables et paramètres structurels pour générer la solution de production électrique optimale. Les éléments structurels sont constants pour chaque scénario ; ils comprennent des facteurs tels que la région, les années ou le type de combustible, tandis que les variables sont des éléments définissant les données techniques et économiques du modèle. Avant l'assemblage du modèle, deux éléments cruciaux doivent être déterminés :

- Time slices ou "tranches de temps" ;
- Groupes technologiques.

Time Slices – Étant donné que la demande, les capacités ou les performances des différentes technologies varient de temps en temps, des tranches de temps sont utilisées pour diviser l'année. Les tranches de temps sont essentiellement désignées comme une partie d'une journée et une fraction de l'année. Ce travail est crucial et doit être défini avec précision afin de pouvoir représenter l'ensemble des profils de demande d'électricité existante sur une année. Dans notre cas, douze tranches de temps, comme le montre la Figure XX, ont été prises en compte, elles sont classées comme suit : **Typologie de la technologie** – L'ensemble des

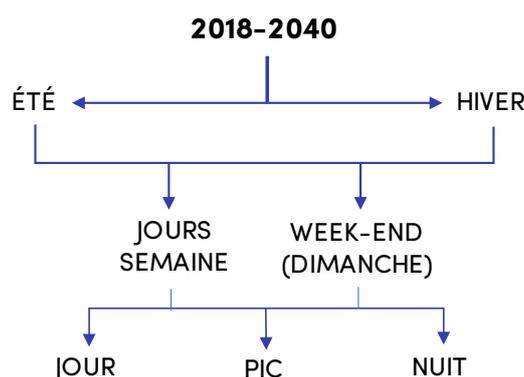


FIGURE 8.7 – Time slices du modèle.

technologies diffèrent en termes de taille, de combustible, de méthode de conversion de l'énergie ainsi que de durée de vie. Certaines centrales électriques peuvent utiliser le même type de combustible. D'autres centrales peuvent fonctionner avec deux combustibles différents, bagasse et charbon par exemple. Par conséquent, la classification des différentes technologies facilite le processus de modélisation. Les combustibles utilisés dans le contexte de la Réunion sont définis comme suit : Bagasse (BAG), Biomasse (BIO), Charbon (CHAR), Fuel lourd (FL), Biogaz (BG), Gaz de décharge (LFG). Les différentes technologies envisagées sont décrites ci-dessous dans le Tableau 8.1.

TABLE 8.1 – Liste des technologies de production d'électricité

Denotation	Description	Operating fuel
BAG_P	Power plants firing bagasse	BAG
CHAR_P	Power plants firing coal	CHAR
Eolien	Wind farm	BIO [in scenario 1 & 2] Wind Potential
FL_P	Power plants firing heavy fuel oil	FL
HYD	Hydro power plants	Water resources
Ocean_thermal	Ocean based plants	OTEC
PV	Solar farms	Sun potential
TaG	Power plants firing gas	Biogaz
WTE	Waste to energy facilities	LFG

Résultats du Scénario BAU – Comme le montre la Figure 8.8, le fioul lourd joue un rôle considérable dans le mix de production pour les années 2018 à 2040; en maintenant

une production d'énergie constante d'environ 1700 GWh pendant la période 2031 - 2040. Afin de répondre à la demande croissante non satisfaite, le fioul lourd entre dans le mix de production à partir de 2031, produisant jusqu'à 650 GWh d'ici 2040. Dans le cas du charbon, le combustible maintient une production d'énergie annuelle de 1200 GWh pour toute la période de modélisation.

En ce qui concerne la part des énergies renouvelables, les centrales hydroélectriques sont

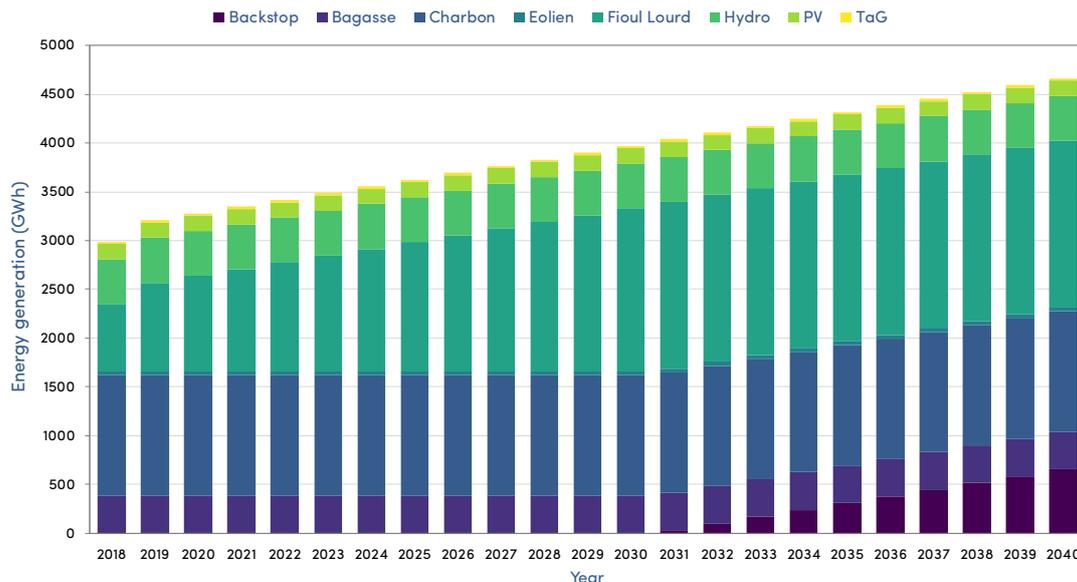


FIGURE 8.8 – Production selon le modèle business-as-usual

pleinement utilisées et produisent 460 GWh par an. Les technologies qui alimentent la bagasse et le biogaz maintiennent également une production énergétique annuelle de 385 GWh et 25,2 GWh respectivement. L'énergie solaire produit 157 GWh tandis que l'énergie éolienne représente 41,2 GWh pour la période 2018-2040. La production constante d'énergie à partir de technologies renouvelables est due au fait qu'aucune augmentation de capacité n'est envisagée dans le scénario BAU.

Résultats du Scénario 1 – Dans le scénario 1, la production d'énergie à partir du charbon est de 1200 GWh entre 2018 et 2024, après quoi les centrales électriques au charbon seront progressivement abandonnées à partir de 2025. Le green pulp est introduit dans le système énergétique à partir de 2025, remplaçant le charbon comme source de combustible de substitution. Le charbon était précédemment associé à la bagasse pour le fonctionnement des centrales thermiques. Le green pulp produit donc une quantité constante de 1200 GWh pour les années 2025 à 2040. D'autre part, avec une réduction progressive de la capacité, le fioul lourd montre une tendance à la baisse de la production d'énergie de 2018 à 2029, représentant 440 GWh en 2029.

À partir de 2030, les centrales au fioul lourd seront progressivement abandonnées. Contrairement au scénario BAU, la technologie d'appoint entre plus tôt dans le mix de production,

c'est-à-dire qu'elle produit environ 210 GWh en 2025, pour passer à 1900 GWh en 2040. Cela peut s'expliquer par l'élimination complète des combustibles classiques, notamment le charbon d'ici 2025 et le mazout lourd d'ici 2030.

Comme dans le scénario BAU, la production d'énergie à partir de la bagasse, de l'hydroélectricité, du biogaz et des ressources éoliennes maintient la même tendance. Avec l'augmentation annuelle de la capacité des technologies solaires, la production d'énergie solaire montre une tendance à la hausse de 2022 à 2040, pour atteindre 405 GWh en 2040. Avec la mise en place d'une centrale WTE de 30 MW en 2022, l'WTE maintient une production constante de 171 GWh de 2022 à 2040.

Ainsi on peut voir que la suppression progressive des capacités de production de combus-

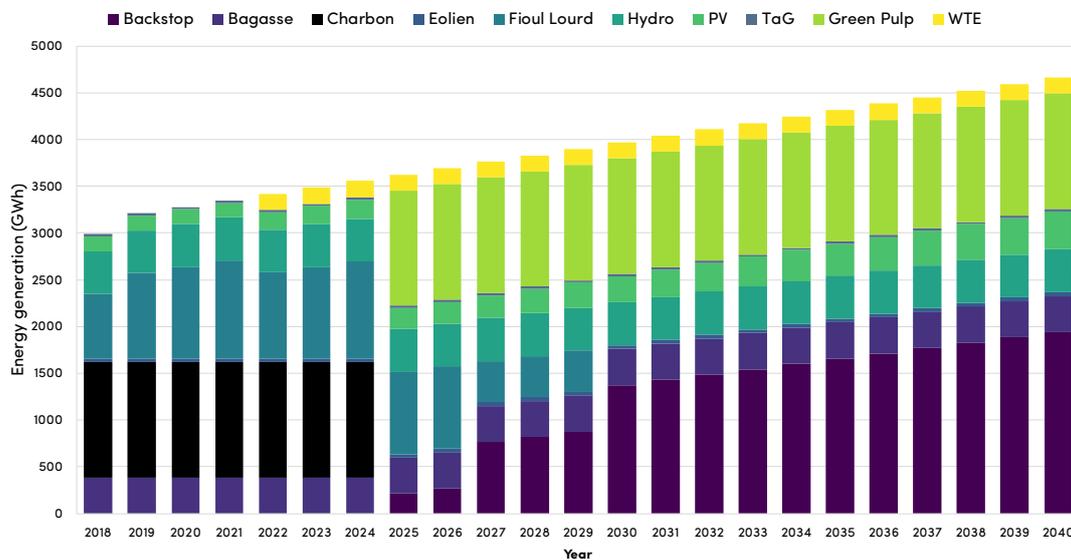


FIGURE 8.9 – Production selon le scénario 1

tibles fossiles ne semble pas aussi évidente que cela. En effet, le backstop représente plus de 40% de la production d'énergie d'ici 2040. Cela remet en question (i) la faisabilité de l'élimination complète du charbon et des combustibles fossiles et (ii) le potentiel d'expansion des capacités de production de sources d'énergie renouvelables. Avec l'introduction du green pulp, de l'expansion solaire et de l'énergie éolienne, la part maximale des énergies renouvelables qui peut être atteinte est de 69,9%.

Résultats du Scénario 2 – D'après la Figure 8.10 et de manière analogue au scénario 1, le charbon et le fioul lourd illustrent la même tendance de production d'énergie ; ils seront progressivement éliminés d'ici 2025 et 2030 respectivement. Avec une augmentation plus importante de la capacité d'Enrs, le backstop entre dans le système énergétique plus tard que dans le scénario 1 ; notamment en 2030, contrairement à 2025 dans le scénario 1. La production d'énergie à partir de la bagasse, de l'hydroélectricité, du biogaz et des ressources éoliennes maintient la même tendance que dans les scénarios précédents. L'énergie solaire montre la même augmentation de production d'énergie ; car l'expansion de la capacité solaire dans le scénario 2 est similaire à celle du scénario 1.

Le green pulp produit également 1200 GWh à partir de 2025, avec l'abandon progressif des centrales au charbon. Avec l'augmentation de la capacité des installations de production d'électricité à partir de déchets, on observe une augmentation de la production d'énergie à partir de ces installations, qui est passée de 171 GWh en 2022 à 515 GWh en 2040. Avec l'introduction des technologies ETM dans le système énergétique, la production maximale d'énergie à partir des ressources thermiques des océans est de 660 GWh d'ici 2040. En 2040, la part de l'énergie couverte par le backstop est inférieure de 50% à celle observée

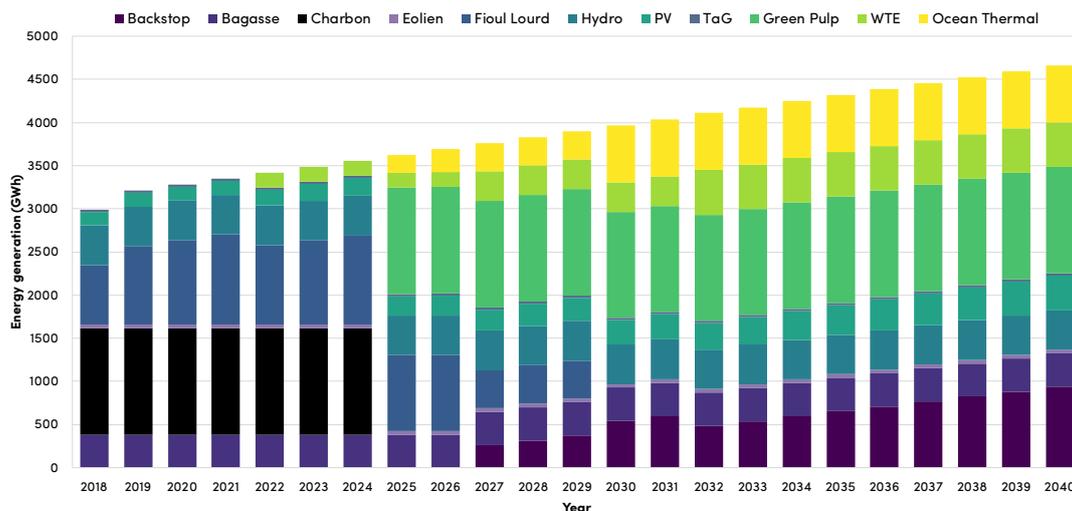


FIGURE 8.10 – Production selon le scénario 2

dans le scénario 1. Cela est dû à un investissement plus important dans les technologies des énergies renouvelables, qui répondent à la demande croissante d'énergie. Avec l'augmentation de la capacité des technologies WTE et ETM, la part des EnRs atteint un maximum de 86% d'ici 2030.

Ces premiers scénarios que nous avons développés nous ont permis de proposer un premier modèle **SARI** pour la Réunion. L'objectif était de définir une structure initiale, que nous pourrions optimiser et modifier par la suite suivant les scénarios souhaités. L'un des premiers éléments a été de traduire les transformations déjà envisagées pour la Réunion, à savoir la substitution du charbon par le green pulp et le développement du secteur solaire. Nous avons souhaité également y introduire une ressource virtuelle appelée "backstop" qui nous permet d'envisager l'introduction d'une technologie encore non existante sur le territoire. Cela nous permettra ou d'envisager une stratégie à partir du stockage ou de définir de nouvelles sources de production qui étaient pour l'heure peu prospectées. Nous pensons en particulier à la production d'énergie à partir des déchets.

8.3.3 Modèle OSeMOSYS pour Madagascar (MAMBA)

▼MAMBA – MadagAscar Model BAseD on OSeMOSYS

Dans le cas de Madagascar, les travaux de thèse que je dirige s'intéresse à sécuriser la pro-

duction électrique mais également à la décarboner afin d'être moins vulnérable du territoire. Nous nous sommes naturellement intéressés à l'intégration des Enrs, en étant en cohérence avec la nouvelle politique énergétique du pays (NPE). La méthodologie est la même que précédemment, nous avons toutefois couplé l'usage de logiciel LEAP à celui d'OSeMOSYS. Avant de pouvoir analyser les stratégies de production, il est nécessaire d'évaluer la demande en électricité. En effet, la production étant fortement corrélée à la demande, la compréhension de la consommation reste un préalable incontournable à l'analyse de la situation énergétique d'un territoire. La projection de la demande utilisée pour les scénarios de production sera donc celle basée sur la NPE :

- Un taux d'électrification de 50% en 2023 et 70% à l'horizon 2030 ;
- Une évolution de l'intensité énergétique selon la tendance actuelle.

Les caractéristiques des technologies utilisées pour les simulations sont détaillées dans le Tableau 8.2.

TABLE 8.2 – Performance et cout des technologies – selon (IRENA)

Technologies	Coûts en capital (US\$/kW)	Coûts fixes (US\$/kW)	Coûts variables (\$/kWh)	Durée de vie (Years)	Capacity Factor (%)	Cout LCOE
Hydro	2500	30	0,004	30	47	0,047
Centrale thermique : Diesel	1200	8	0,002	10	80	0,22
Centrale thermique : Fuel lourd	1000	0	0,055	10	80	0,28
Onshore wind	1452	0	0,0318	25	34	0,085
Solar PV	1356	0	0,0213	25	18	0,056
Biomasse	2055	105	0,0043	20	78	0,062

Pour permettre le calcul des émissions GES engendrées pour chaque scénario, il est nécessaire d'entrer le facteur d'émission de chaque technologie et donc de les calculer à part. La méthode utilisée pour évaluer l'impact environnemental de chaque technologie utilisée pour le cas de Madagascar est celle de l'ACV en utilisant l'outil GEMIS. Nous reviendrons au chapitre suivant plus en détail sur les calculs d'analyse de cycle de vie. Cinq scénarios sont pris en compte :

- Scénario **BAU** | Tendence actuelle ;
- Scénario **NPE** | Traduit les objectifs en matière de politique énergétique que le pays s'est fixé ;
- Scénario optimisé **OPT** | le mix électrique est défini par optimisation du cout économique (cout LCOE et cout d'investissement) et du cout environnemental ;
- Scénario à faible cout d'investissement **LIC** | le mix électrique est défini en minimisant le cout d'investissement et en limitant l'émission CO₂ ;
- Scénario **OPTS** | De même que le scénario OPT, le mix électrique est défini par optimisation du cout économique (cout LCOE et cout d'investissement) et du cout environnemental, cependant un pourcentage minimum de centrale solaire est imposé.

Comme le montre la Figure 8.11 chaque scénario le mix électrique est dominé par les centrales hydrauliques, ce qui s'explique par l'abondance de ressources hydrauliques à Madagascar. Le scénario **BAU** conserve la tendance actuelle du mix électrique de Madagascar

jusqu'à 2040 avec un cout de production de 0,130 USD/kWh et un facteur d'émission de 0,439 kgCO₂eq/kWh. Pour 2023, pour satisfaire la demande des 50% de la population électrifiée, le scénario NPE prévoit une production d'électricité à partir de 59% d'hydro, 23% centrales thermiques FO, 7% centrales thermiques GO, 8% Solaire, 2% Eolien et 2% Biomasse. Cela équivaut à un cout de production de 0,114 USD/kWh avec un facteur d'émission de 0,348 kg CO₂eq/kWh.

Le scénario OPT en optimisant le cout économique (cout LCOE et cout d'investissement) et

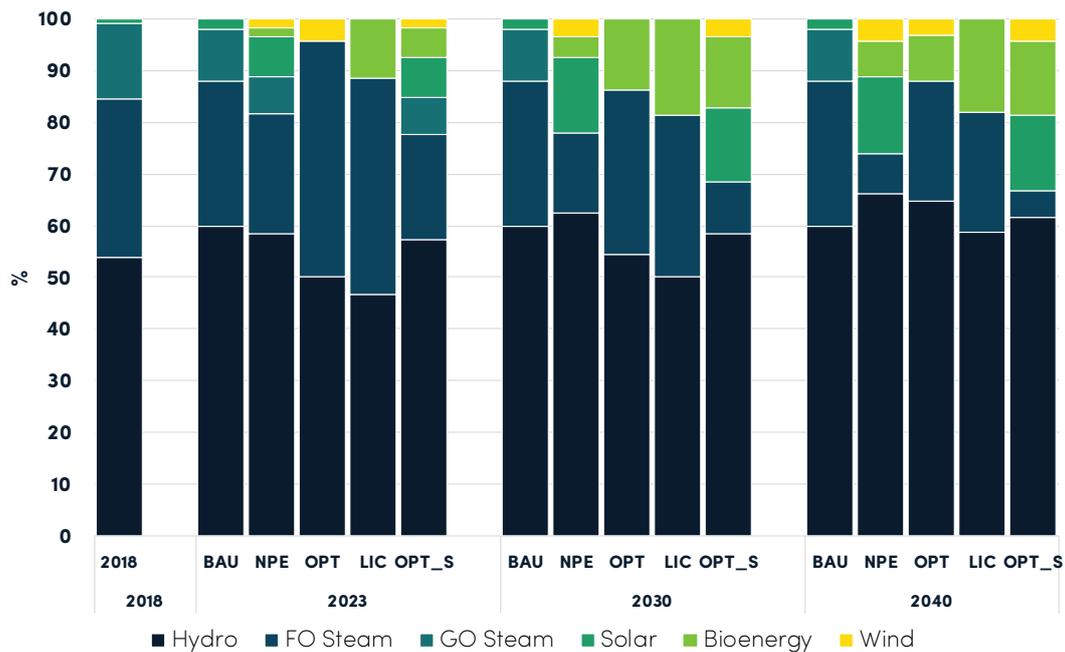


FIGURE 8.11 – Résultats des mix électriques selon les différents scénarios.

le cout environnemental ressort un mix électrique 50 % d'hydro, 46% FO Steam et 4% Wind pour 2023 avec un cout de production de 0,133 USD/kWh. En minimisant le cout d'investissement, mais limitant l'émission CO₂, le scénario LIC avec un mix à 47% d'hydro, 42% de FO Steam et 11% de biomasse présente un facteur d'émission de 0,404 kg CO₂eq/kWh pour un cout de production de 0.146 USD/kWh. Le scénario OPT_S qui optimise le cout économique (cout LCOE et cout d'investissement) et cout environnemental en imposant un pourcentage minimum de centrale solaire, propose un mix électrique de 57% d'hydro, 20% de fuel, 7% de GO, 8% de solaire, 6% de Bioénergie, 2% d'éolien. Le facteur d'émission est de 0,406 kg CO₂eq/kWh pour un cout de production de 0,115 USD/kWh.

Pour l'année 2023, les couts que ce soit les couts économiques ou les couts environnementaux sont à peu près similaires pour les différents scénarios. En l'espace de 5 ans, le taux d'intégration des énergies renouvelables pour les scénarios n'est pratiquement pas différent de la situation actuelle. En effet, pour subvenir au fort accroissement du taux d'électrification prévue pour 2023, la part des centrales thermiques diminue graduellement jusqu'en 2023.

Pour 2030, le scénario NPE prévoit un mix électrique avec 84,50% d'énergie renouvelable dont

62,50% d'hydro, 15,5% de FO Steam, 14,50% de centrales solaires, 4% de bioénergie, 3,50% d'éolien. Ce mix équivaut à un facteur d'émission de 0,287 CO₂eq/kWh et un coût de production de 0,084 USD/kWh. Le scénario OPT avec 68,06 % d'énergie renouvelable avec 54,43% d'hydro, 31,94% de FO Steam, 13,63% de bioénergie. Ce scénario enregistre un coût de production de 0,105 USD/kWh et un facteur d'émission de 0,314 CO₂eq/kWh. Le scénario LIC est composé d'un mix électrique de 50,12% d'hydro, 31,31% de FO Steam, 18,57% de bioénergie soit 68,68 % d'énergie renouvelable. Ce scénario enregistre un coût de production de 0,105 USD/kWh et un facteur d'émission de 0,314 CO₂eq/kWh. Le scénario OPT_S est composé d'un mix électrique de 58,50% d'hydro, 10% de FO Steam, 14,50% de centrales solaires, 13,50% de bioénergie, 3,50% d'éolien, soit 90% d'énergie renouvelable d'ici 2030. Le facteur d'émission est de 0,127 CO₂eq/kWh et le coût de production est de 0,055 USD/kWh.

En outre, l'analyse des scénarios mettent en exergue deux faits à analyser : l'enjeu de l'indé-

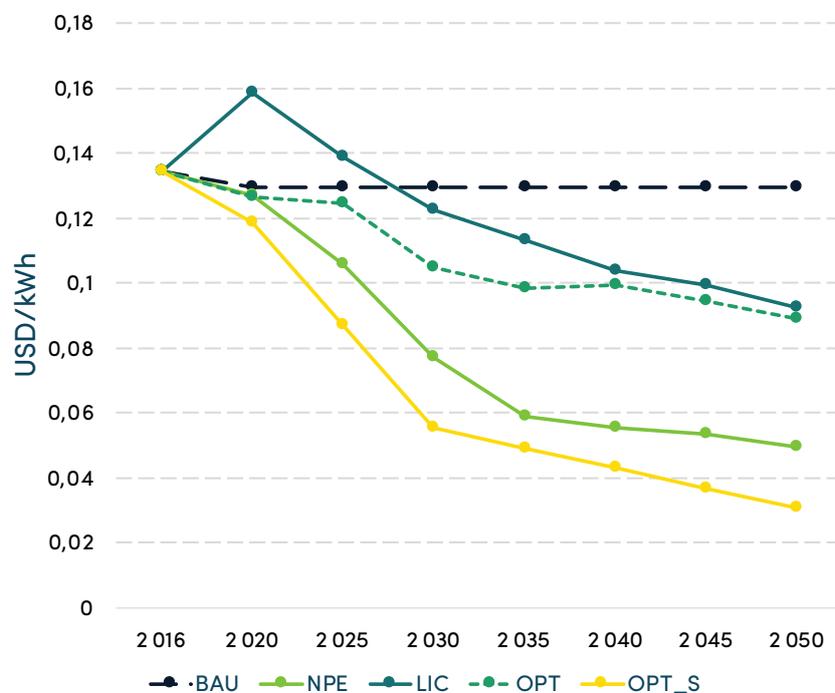


FIGURE 8.12 – Evolution du coût de production énergétique selon les différents scénarios.

pendance énergétique et l'importance du niveau de financement. En effet, l'impact du coût du kWh produit a dans le cadre de Madagascar une importance toute particulière, voir Figure 8.12. Pour répondre aux objectifs d'augmentation du taux d'électrification, il y a deux possibilités :

- Augmenter la part d'énergie renouvelable dans le mix électrique et tendre graduellement vers un minimum d'utilisation de centrales thermiques. Cette option nécessite un niveau conséquent d'investissement à court terme. Cependant, à long terme, le coût de production diminue. De plus, ceci garantit l'indépendance et la sécurité énergétique.

- Garder la part actuelle de centrales hydrauliques et favoriser l'utilisation de la biomasse (jusqu'à environ 19%). Cette deuxième option permet de minimiser le coût d'investissement tout en garantissant l'accès à l'électricité au détriment d'une dépendance aux centrales thermiques à environ 30%. Certes, le facteur d'émission de la production en électricité de Madagascar reste relativement faible par rapport aux autres pays de l'Océan Indien pour tous les scénarios. L'importance de la transition énergétique réside surtout dans la sécurité énergétique.

La problématique de la transition énergétique à Madagascar s'entrevoit donc comme celle des ZNI, car le réseau électrique ne maille pas l'ensemble du territoire. De ce fait, les enjeux de production se localisent dans un premier temps au sein des grandes villes et en périphérie. À cela s'ajoute un deuxième cas à considérer qui sera celui de l'électrification rurale. Le coût du kWh jouera un rôle important sur les orientations stratégiques du développement du mix électrique. Ainsi, nous devons considérer des scénarios différents qui devront être régionalisés pour répondre aux besoins spécifiques et surtout mettre en correspondance les coûts induits.

8.4 Synthèse

L'acte de produire de l'électricité n'est absolument pas anodin et a un fort impact sur notre environnement. Selon les statistiques de l'IRENA, la part d'énergies renouvelables n'excède pas les 24,9% en 2018. Cela ne traduit un accroissement que de 0,5% par rapport à 2017 à l'échelle mondiale. Dans cette situation, il est à noter que l'hydroélectricité représente encore près de 63%. Cette situation est encore plus marquée dans les espaces insulaires. Les îles concentrent à la fois un certain nombre de contraintes structurelles à leur territoire, mais aussi offre un formidable espace expérimentation et de mise en place stratégique d'une planification énergétique dans le cadre de la transition énergétique. Ainsi l'enjeu de nos travaux était de faire correspondre une analyse des données du passé nous permettant de comprendre les dynamiques en cours dans un premier temps. Puis, construire les chemins possibles aux regards des ambitions d'une décarbonisation de notre mix électrique. Nous disposons dès lors d'un environnement validé pour développer nos scénarios pour la Réunion. Il s'agit pour nous à présent au-delà des gisements existants de définir nos trajectoires par optimisation (contrainte environnementale, spatiale, etc.). L'objectif est d'évaluer comment réussir cette transition la plus rapidement possible et quels moyens devons-nous mobiliser pour y parvenir? Les travaux que je mène et que je souhaite développer au sein du labo s'attache donc à définir les besoins et réfléchir au déploiement de la production d'électricité associée. Les cas d'expérimentation que représentent les îles sont particulièrement intéressants car les ressources sont localisées. De fait, identifier clairement les gisements permet de planifier les stratégies à développer pour répondre à la demande.

VALORISATION – 1 article en rédaction. Les travaux menés ont reçus le financement de deux projets : PHC Réduit, ERASMUS+).

ENCADREMENT – J'encadre 2 thèses une Région INTERREG, à l'université de la Réunion | Thèse à University of Mauritius – J'ai également encadré un stage du MASTER 2 EBENE sur le développement d'un scénario optimisé biomasse.

FORMATION – La méthode LMDI a été depuis deux ans intégrée dans le cadre des formations de M2 VEU et EBENE. J'ai suivi une formation à l'UoM en 2018, et doit suivre une session complémentaire de perfectionnement en décembre 2020 dans le cadre d'un atelier dédié pour les territoires de la zone Océan Indien.

L'analyse environnementale

Sommaire

9.1	Introduction	155
9.2	L'analyse de cycle de vie (ACV)	156
9.3	Qualité environnementale des mix électriques en milieu insulaire	160
9.4	La décomposition Kaya-LMDI	162
9.5	Cycle de vie des bâtiments	166
9.5.1	Contexte et méthode	167
9.5.2	Quelle typologie des constructions individuelles à la Réunion	169
9.5.3	Impacts, effet d'insularité et politiques	169
9.5.4	Quelles conséquences pour la politique énergétique?	173
9.5.5	Cycle de vie, déchets et durabilité	174
9.6	Synthèse	176

LA question du changement climatique est un enjeu global appelant une mobilisation mondiale, pour autant les réponses ou actions demeurent pour de nombreux aspects régionaux et propres aux réalités économiques de chaque territoire. Ces préoccupations environnementales sont aujourd'hui de plus en plus au coeur des décisions politiques et nécessitent des outils d'évaluation et de compréhension des impacts afin de définir des stratégies de minimisation. De nombreux secteurs s'intéressent à cette évaluation environnementale (l'énergie, la construction, mobilité, etc.). Dans ce chapitre, je présente les travaux menés depuis plus de cinq ans à partir des outils de bilan et d'ACV sur l'évaluation environnementale. Nous aborderons successivement, les questions liées à la production d'électricité et la construction des bâtiments en situation insulaire. Toujours dans la logique de la réduction ces effets sur l'environnement dus à l'activité anthropique, nous aborderons, la recherche récemment initiée sur les substituts au plastique. Ce travail est une collaboration avec l'University of Mauritius.

9.1 Introduction

Sans revenir au cadre historique de définition du développement durable, en vingt ans la question environnementale s'est invitée à la table de tous les débats : économiques, poli-

tiques, etc. Une attention croissante est accordée à ces questions. Cela se décline à diverses échelles, repenser l'aménagement des villes, décarboner la production de l'électricité, tendre vers une frugalité dans l'usage des matériaux, de l'énergie ou des techniques de construction, etc. Ainsi la prise en compte de notre impact interroge notre responsabilité à travers nos modes de vie et de notre société basés sur un modèle de développement très consommateur de ressources naturelles. Un état de l'art de la recherche sur cette question portée ces vingt dernières [Schöggel 2020] met en avant une prédominance des enjeux environnementaux. Les déchets, l'utilisation des ressources et les émissions du CO₂) sont traités de façon prioritaire. Ainsi, il apparaît important de pouvoir réfléchir rapidement aux outils et aux différents modèles qu'il serait nécessaire de promouvoir pour un modèle de développement d'une transition circulaire comme décrit dans la Figure 9.1.

Dans le contexte des ZNI, l'économie circulaire (EC) prend tout son sens. Pour l'heure, l'EC

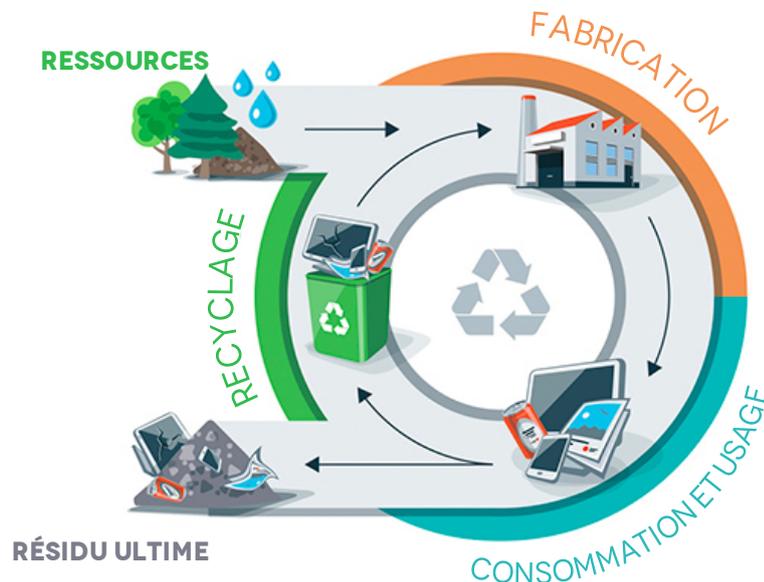


FIGURE 9.1 – Principe général de l'économie circulaire.

s'est beaucoup interrogé sur la gestion des déchets. Ainsi dans les travaux que nous abordons, dans ce chapitre nous verrons l'usage d'une approche méthodologique de l'évaluation environnementale, pour nous aider dans la qualification de l'impact de la production d'électricité et les espaces bâtis. L'analyse de cycle de vie sera l'outil central nous permettant d'évaluer, mais aussi créer de l'information pouvant servir à la construction de scénarios.

9.2 L'analyse de cycle de vie (ACV)

L'ACV est un outil permettant d'appréhender l'impact environnemental du berceau à la tombe d'un produit, d'un équipement, comme celui d'un bâtiment. Cette méthode norma-

lisée évalue donc les impacts environnementaux à chacune des étapes du cycle de vie d'un processus [Jolliet 2010]. On peut ainsi mettre en lumière les autres enjeux environnementaux : déchets, eau, épuisement des ressources et autres indicateurs. L'ACV a considérablement évolué au fil des ans et constitue un outil décisionnel utile pour évaluer les impacts environnementaux des matériaux de construction et faciliter l'optimisation du choix entre différentes solutions. Finalement, un résumé des différentes définitions de l'ACV pourrait se formuler de la manière suivante : *C'est une méthode systémique permettant d'effectuer un bilan des flux matières et énergie d'un produit, à différentes échelles spatio-temporelles.* Compte tenu de la grande flexibilité qu'il peut exister dans le périmètre d'étude, l'ACV se veut être de nature informative permettant de mettre en exergue les aspects environnementaux dans un processus décisionnel. Elle ne saurait en aucun cas constituer à elle seule un outil d'aide à la décision.

Les premières études d'impact sur l'environnement des années 1960 se sont concentrées sur l'évaluation ou la comparaison des biens de consommation [Guinee 2011]. Le développement de l'ACV s'explique tout d'abord par les problèmes rencontrés par l'accumulation croissante des problèmes de ressources, ainsi que par l'approvisionnement limité en énergie [Klöppfer 2014]. Au début des années 1990, des inquiétudes ont été soulevées quant à l'utilisation des résultats de l'ACV et à leur affirmation par les fabricants de produits quant aux avantages environnementaux de leurs produits en vue de leur commercialisation [Curran 2008]. L'ACV a attiré davantage l'attention des scientifiques au début des années 1990 en raison de la détérioration accélérée de l'environnement et de la prise de conscience des enjeux du changement climatique [Tillman 2004]. Les organisations environnementales ont fait pression pour normaliser la méthodologie et les lignes directrices de l'ACV au niveau international. La méthodologie normalisée pour l'ACV a été publiée pour la première fois par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) dans le cadre de la série ISO 14040 en 1997.

Depuis la publication initiale de la série ISO 14040, elle a été révisée en 2006 [ISO-Norm 2006]. Le cadre de l'ACV a été développé par la série ISO 14040 selon le Tableau 9.1. Les normes ISO 14040 et 14044 ont été adoptées au niveau international pour des normes et lignes directrices spécifiques afin de faciliter une analyse régionale plus précise, mais aussi pour faciliter, entre autres, une communication plus transparente afin d'améliorer la performance environnementale des bâtiments ainsi que les pratiques durables dans l'industrie de la construction.

Une étude ACV comporte quatre phases principales, selon la Figure 9.2 : les flèches in-

TABLE 9.1 – Les normes ISO associées à l'ACV.

Organisation Internationale de normalisation	
ISO 14040	Principes et cadre
ISO 14041	Objectifs et portée de l'étude – Définition et analyse des stocks
ISO 14042	Evaluation de l'impact du cycle de vie
ISO 14043	Interprétation du cycle de vie
ISO 14044	Exigences et lignes directrices

diquent l'interaction au sein des phases et entre celles-ci afin de garantir que l'objectif, la

portée de l'étude, les méthodes et résultats sont cohérents, complets et pertinents. Les résultats d'une étude ACV varient en fonction de l'objectif et de la portée initialement définis. Deux grandes familles d'ACV sont en général utilisés en fonction des objectifs attendus, en effet, celle-ci peut être attributive ou conséquentielle. La principale différence entre l'ACV attributive et l'ACV conséquentielle est que la première approche se concentre sur les impacts environnementaux associés à un produit au cours de son cycle de vie, tandis que l'ACV conséquentielle se concentre sur la description des effets de tout changement, c'est-à-dire les niveaux de production du cycle de vie.

Les méthodes d'évaluation basées sur l'ACV se sont remarquablement développées ces der-

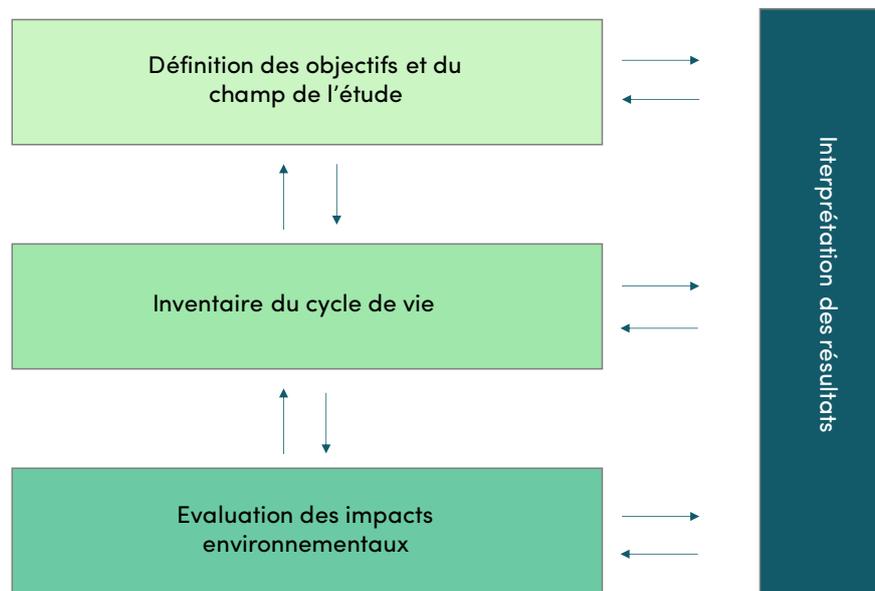


FIGURE 9.2 – Les quatre étapes de l'analyse de cycle de vie.

nières années. Cependant, il n'existe pas de méthodologie communément acceptée capable d'estimer de manière exhaustive les impacts environnementaux choisis (impacts climatiques, utilisation des terres et changement d'affectation des terres, épuisement des ressources, utilisation de l'eau, impacts sur la qualité des sols et changements de la biodiversité). Malgré les études de cas que l'on peut référencer sont parfois difficilement comparables du fait d'un périmètre d'étude différent, de la forte incertitude liée aux données, etc. [Holma 2013]. De nombreux défis sont encore à relever vis-à-vis de la qualité des bases de données. En effet, les impacts environnementaux dépendent énormément de la localisation géographique et par conséquent de la qualité des données collectées afin de représenter de la façon la plus pertinente le système étudié. Ainsi, dans l'exemple de l'étude [Morales 2019] effectué au Brésil, les résultats mettent bien en avant la difficulté des territoires en développement de disposer de données pour mener à bien une ACV. En effet, les écarts entre les données génériques issues de bases internationales et des données propres au Brésil dans le cas des bâtiments influent de façon significative l'évaluation.

Cette remarque est une des raisons importantes qui nous a mobilisés depuis plusieurs années pour mettre en oeuvre des données spécifiques au contexte de la Réunion. Nous avons

ainsi dans le cadre de deux thèses celle de Vanessa Rakotoson et Leslie Ayagapin portant respectivement sur l'évaluation environnementale de la production électrique et des bâtiments/quartiers. Nous présenterons dans les parties qui suivent des applications de cet ACV dans le cas de l'énergie et de la construction. Anisi la qualité des facteurs d'émission dans l'inventaire du cycle de vie (ICV) va permettre une quantification des flux élémentaires (ressources, émissions air et eau) que l'on échange avec l'environnement par unité fonctionnelle(UF) de l'étude.

À partir des données de l'inventaire, la classification des résultats permet de définir les indicateurs qui seront ensuite, eux aussi, classifiés pour définir des catégories d'impacts. Nous distinguons quatre catégories d'impacts relatifs à la santé, à la qualité de l'écosystème, au changement climatique et à la consommation des ressources (voir figure 9.3). Les indicateurs

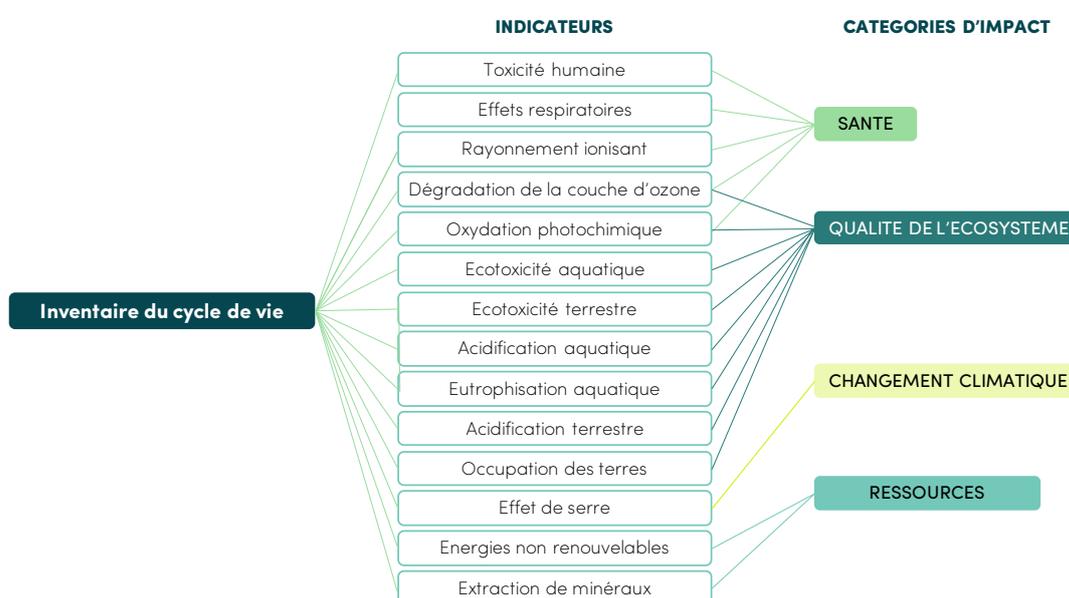


FIGURE 9.3 – Classification des résultats d'inventaire en indicateurs environnementaux et en catégories d'impact.

en ACV sont nombreux, le choix des indicateurs à suivre doit se faire vis-à-vis des questionnements de recherche. Ainsi, on retrouve l'indicateur de réchauffement climatique (GWP) comme le plus cité, et le plus au centre des débats politiques. Pour autant, ce seul indicateur peut s'avérer trompeur et amené à des conclusions. À titre d'illustration, une comparaison d'une construction en bois plutôt qu'en béton donne un avantage au bois si l'on observe au prisme du GWP. Toutefois, si l'analyse tient compte de la séquestration du carbone au sein d'une forêt de bois exotique, des traitements successifs récurrents nécessaires tout au long du cycle de vie d'un produit bois, alors le bilan change du tout au tout. Un rapport européen de la JRC [JRC 2012] détaille le choix des indicateurs à retenir pour l'étude de l'impact des pays de la zone UE. Par exemple pour répondre à la question de savoir si l'UE 27 diminue sa pression sur les ressources, la JRC suggère d'utiliser des indicateurs tels que les émissions de CO₂, l'occupation des sols etc.

Concernant les outils de calcul, de nombreux logiciels tel que SIMAPRO, OPENLCA, etc. permettent de faire l'ACV. Toutefois, ces environnements sont souvent construits pour les pays développés et ne donnent pas accès au code afin de modifier les modèles. Ainsi, nous avons fait le choix travaillé sous l'environnement GEMIS¹ développé par l'IINAS. Ce logiciel présente l'avantage d'être open source, il nous permet de construire les processus librement et de les adapter à nos conditions géographiques. Ainsi plutôt que de prendre un facteur d'émission générique d'une base de données internationale, il est alors possible d'affiner le processus et de paramétrer la chaîne d'évaluation.

Pour illustrer cette méthodologie, nous présentons un exemple de chaîne de processus d'une centrale de production à base d'énergie fossile, soit la centrale à turbine à vapeur fonctionnant au charbon, selon la Figure 9.4. Ce processus est celui utilisé dans la modélisation des mix électrique de la Réunion ou encore Maurice. On peut ainsi distinguer au sein de la partie encadrée l'étape correspondant à l'extraction du charbon. Puis considérant le processus me-

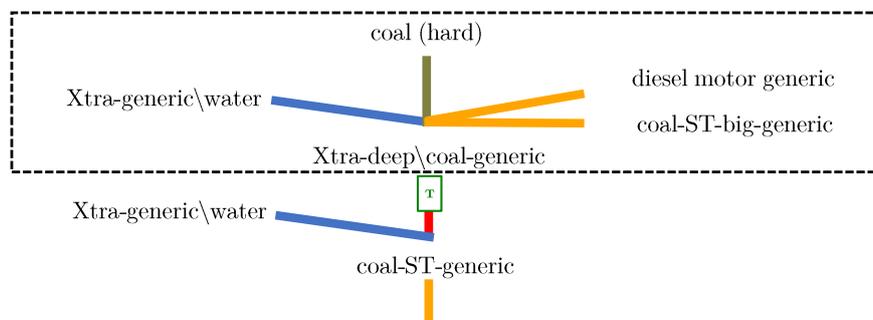


FIGURE 9.4 – Processus d'une centrale à charbon à partir de GEMIS

nant à *Xtra-deep\coal-generic* comme étant le système de production, nous obtenons ainsi le processus d'extraction de la matière première. Ce processus est donc intégré dans notre base de données. En procédant de manière équivalente pour toutes les centrales à base d'énergie fossiles, il nous est alors possible de constituer notre base de données spécifique à un territoire.

9.3 Qualité environnementale des mix électriques en milieu insulaire

Dans les espaces insulaires, la production d'électricité est souvent carboné. Dans le cas particulier des PEIDs, les enjeux sont même parfois l'accès à l'électricité ou la sécurité énergétique. Une utilisation plus large des énergies renouvelables peut ainsi contribuer localement à réduire le coût important des importations de combustibles fossiles utilisés actuellement, et contribuer également à réduire efficacement l'intensité environnementale de production d'électricité. L'amélioration de l'efficacité dans l'utilisation finale et la distribution de l'énergie est également crucial. Ainsi, il est de plus en plus courant de planifier une décarbonation

1. Global Emissions Model for integrated Systems

des mix électriques, cela dans l'optique d'être moins vulnérable aux importations de ressources fossiles.

Une des premières étapes a donc été de mettre en place une évaluation automatique de la production électrique dans le cas d'espaces insulaires. Nous nous sommes intéressés au cas des territoires outre mer français. Dans une précédente étude, [Notton 2015] a fourni la localisation géographique des installations électriques sur les territoires français et la production annuelle moyenne. Le document s'est principalement concentré sur les territoires suivants pour l'année de référence 2013 : La Corse, la Guadeloupe, la Martinique, Mayotte, la Guyane française et la Réunion. L'éloignement implique une augmentation de la distance moyenne d'approvisionnement en produits pétroliers. Le transport des carburants est un facteur important des émissions de CO₂ dans l'évaluation globale de l'ACV. GEMIS fournit les données sur les émissions de chaque production d'électricité, tout au long de son cycle de vie : extraction des matières premières et des quantités nécessaires pour produire un kWh d'électricité, moyens de transport existants, construction des infrastructures et production. Ces données sont ensuite traitées dans MATLAB.

$$E_{Tot} = \sum_{i=1}^n E_{ext,i} + E_{trans,i} + E_{cons,i} + E_{prod,i} \quad (9.1)$$

Ensuite, conformément à la méthodologie de l'ACV, plusieurs données sont nécessaires : la production totale d'électricité, la capacité installée, la distance d'approvisionnement en matières premières et le moyen de transport utilisé. Ces données permettent de déterminer la quantité de matières premières, le facteur d'émission (FE) adapté à la taille de la centrale électrique installée, et indiquent l'éloignement du territoire. L'émission totale E_{Tot} du mix électrique du territoire étudié est obtenue par Eq. 9.1.

Comme nous l'avons indiqué précédemment à la Figure 9.3, l'ACV met généralement en évidence différents indicateurs regroupés en quatre grandes catégories : le changement climatique, la qualité des écosystèmes, la santé humaine et l'épuisement des ressources. Pour l'étude des mix électrique nous avons choisi de présenter un échantillon d'indicateurs représentant chaque catégorie, qui sont les plus représentatifs de chaque catégorie d'impact : le potentiel de réchauffement planétaire (GWP), le potentiel d'acidification (AP), le potentiel des précurseurs de l'ozone troposphérique (TOPP) et l'utilisation cumulative d'énergie (CEU). Comme le montrent les résultats obtenus à la Figure 9.5 pour les différents indicateurs : Mayotte enregistre les plus hauts niveaux de GWP et de AP et est la région qui consomme le plus d'énergie pour produire 1 kWh après la Martinique. La tendance générale des autres impacts environnementaux est sensiblement la même. En ce qui concerne les résultats de la figure 9.5, Mayotte produit la plus grande quantité d'émissions à GWP avec 0,921 kg CO₂eq/kWh, suivie de la Martinique (0,883 kg CO₂eq/kWh) et de la Guadeloupe (0,846 kg CO₂eq/kWh). Ces résultats s'expliquent par l'utilisation massive de sources de combustibles fossiles dans ces territoires. La Réunion a généré environ 0,687 kg CO₂eq/kWh. Grâce à l'utilisation "massive" des EnR et à l'interconnexion des réseaux, la Corse et la Guyane émettent moins de polluants que les autres territoires, avec respectivement 0,505 et 0,373 kg CO₂eq/kWh.

On peut voir sur la Figure 9.5 que Mayotte a la valeur AP la plus élevée, suivie par la Martinique et la Guadeloupe. Le principal contributeur à la Réunion est l'exploitation de la centrale

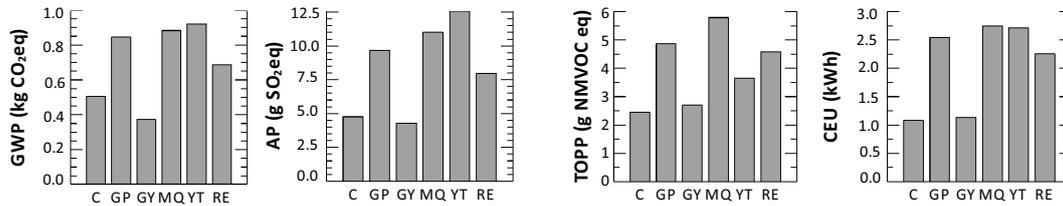


FIGURE 9.5 – Impacts environnementaux par kWh [C : Corsica, GP : Guadeloupe, GY : French Guyana, MQ : Martinique, YT : Mayotte, RE : Reunion] – selon [Rakotoson 2017].

à charbon (67%). Dans les autres îles, les centrales au fioul contribuent au moins à 61%, comme en Guadeloupe, suivie par le charbon (35%). En général, l'hydroélectricité et les panneaux solaires ne dépassent pas 1% de la contribution totale en potentiel d'acidification.

Le TOPP est l'équivalent en masse du taux de formation d'ozone. Cela représente la formation potentielle de O₃ proche du sol (troposphérique), qui peut causer le smog estival. La répartition des contributions de chaque centrale électrique aux émissions de TOPP est assez similaire à celle des émissions de AP. Cependant, la Martinique a enregistré la valeur la plus élevée des émissions de TOPP produites par 1 kWh (0,0057 g eq. NMVOC), suivie de la Guadeloupe et de la Réunion.

Le CEU représente la dépense de ressources énergétiques (énergies primaires) pour la production de 1 kWh. Comme on peut le voir à la Figure 9.5, la Martinique et Mayotte ont les valeurs les plus élevées de CEU, ce qui s'explique par la forte proportion d'énergies fossiles dans leur production.

Les valeurs des différents indicateurs servent ainsi de référence pour définir les futurs scénarios pour la décarbonation. Afin de répondre aux ambitions de réductions des émissions de gaz à effet serre, nous pouvons construire des scénarios qui vont inclure ces émissions comme paramètre de contrainte à optimiser dans la définition du bouquet énergétique.

9.4 La décomposition Kaya–LMDI

Les émissions de CO₂ liées à l'électricité de Madagascar dans cette partie sont analysées selon une approche qui résulte de la combinaison de l'identité Kaya et de l'indice LMDI. L'objectif est de pouvoir identifier et quantifier les liens entre les émissions de CO₂ et les activités humaines.

Le concept de l'IPAT, de plus en plus populaire, consiste à diviser les impacts environnementaux (I) en trois facteurs : la population (P), la richesse (A) et la technologie (T). En établissant des liens entre les dimensions environnementales et socio-économiques, [Mahony 2013], l'IPAT permet de mesurer les impacts environnementaux des activités humaines, [Mahony 2013, Rosa 2012, Lima 2016], tels que résumés dans l'équation 9.2 :

$$\text{Impact (I)} = \text{Population (P)} \times \text{Affluence (A)} \times \text{Technology (T)} \quad (9.2)$$

Sur la base de l'équation IPAT, l'identité de Kaya applique ce principe aux émissions de GES, ce qui permet d'évaluer les facteurs d'émission de CO₂ liés à l'énergie [Rosa 2012, Ma 2018], selon :

$$CO_2 = Population \times \frac{GDP}{Population} \times \frac{Energy}{GDP} \times \frac{CO_2}{Energy} \quad (9.3)$$

A partir de l'Équation 9.3, les effets des différentes variables et leur évolution dans le temps peuvent être étudiés quelle que soit l'échelle géographique choisie (ville, région, pays, monde). En outre, de nombreux chercheurs ont étendu ou modifié l'équation de base de Kaya pour y inclure d'autres variables explicatives selon la nature de leurs recherches. Dans le cas présent, en ce qui concerne la consommation d'électricité, Madagascar est un pays caractérisé par un faible taux d'électricité et une dépendance aux combustibles fossiles. En conséquence, la vision de la politique énergétique du pays est principalement axée sur l'augmentation de l'accès à l'électricité et la promotion des énergies renouvelables. Ainsi, pour intégrer les spécificités du secteur électrique malgache dans l'analyse, l'équation de Kaya a été modifiée comme suit :

$$C = \sum_i C_i = \sum_i \left(\frac{C_i}{FF_i} \times \frac{FF_i}{FF} \times \frac{FF}{E} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{GDP}{P_{elec}} \times \frac{P_{elec}}{P} \times P \right) \quad (9.4)$$

où C_i représente l'émission de carbone de la source d'énergie de type i , FF_i l'électricité produite par la source d'énergie de type i , FF la production totale d'électricité, E la consommation totale d'électricité, P le nombre d'habitants et P_{elec} le nombre d'habitants ayant accès à l'électricité. Le groupe "technologie" fait référence à la technologie utilisée dans le système de production d'électricité : le facteur d'émission de CO₂ par source d'énergie (C_i/FF_i), le mélange d'électricité (FF_i/FF) et les pertes d'énergie lors de la distribution (FF/E). Le groupe "affluence" exprime la richesse du pays par rapport à sa consommation d'électricité à travers le rapport de la consommation d'électricité au PIB (E/GDP) et le rapport du PIB par habitant au taux d'électrification (GDP/P_{elec}). Le groupe "population" désigne les caractéristiques liées à la dimension sociale : le taux d'électrification (P_{elec}/P) et le nombre d'habitants (P). L'équation de Kaya modifiée passe ensuite par une méthode de décomposition qui quantifie l'effet des paramètres considérés sur l'évolution de l'émission de CO₂. La méthode la plus couramment appliquée à cet effet est le LMDI [Wang 2005, Zhou 2014]. Nous avons résumé la décomposition LMDI dans le Tableau 9.2.

Pour les variations annuelles ou agrégées, l'évolution des émissions de CO₂ suit la tendance des variations générées par la technologie du système de production d'électricité. En effet, en ce qui concerne l'ACV, l'émission de CO₂ du secteur de l'électricité est liée au mix électrique. Cependant, l'analyse par la méthode combinée Kaya-LMDI montre l'importance des facteurs exogènes dans l'impact environnemental du secteur de l'électricité.

D'une part, les résultats révèlent que l'augmentation des émissions de CO₂ est principalement due à l'évolution de la situation démographique du pays, représentée par le groupe de population. Comme le montre la Figure 9.6, la tendance de l'effet du groupe de population et l'effet total sont de même tendance. D'autre part, la situation économique de Madagascar par rapport à son taux d'électrification, exprimé par le groupe d'affluence, contribue à la

TABLE 9.2 – Definition des effets de la LMDI

Group	Effect	Notation	Variable	Significance
Technology	Emission-factor effect	C_{ef}	$F_i = \frac{C_i}{FF_i}$	Effect of the CO_2 emission factor for each type of energy source
	Energy-mix effect	C_{em}	$S_i = \frac{FF_i}{FF}$	Effect of the share of each energy source in electricity production
	Energy-loss effect	C_{el}	$L = \frac{FF}{E}$	Effect of energy losses in electricity distribution
Affluence	Energy-intensity effect	C_{ei}	$I_1 = \frac{E}{GDP}$	Effect of electricity consumption to GDP ratio
	Economic-related electrification rate effect	C_e	$I_2 = \frac{GDP}{P_{elec}}$	Effect of economic growth in relation to the electrification rate
Population	Electrification rate effect	C_{er}	$I_3 = \frac{P_{elec}}{P}$	Effect of changes in the electrification rate
	Population effect	C_{pop}	P	Effect due to population growth

réduction des CO_2 émis par le secteur de l'électricité. De 1990 à 2015, les émissions de CO_2 augmentent de +688 kt, avec un impact de +649 kt pour le facteur population, -222 kt pour le facteur richesse et +261 kt pour le facteur technologie.

En outre, comme l'illustre la Figure 9.6, la variation du GWP de 1990 à 2015 peut être subdivisée en cinq périodes d'alternance de hausses et de baisses (1990-1992; 1992-1997; 1997-2006; 2006-2010; 2010-2015). La première période considérée, 1990-1992, montre une augmentation des émissions de CO_2 . Cette augmentation est principalement due au groupe technologique, qui a généré une hausse de 48 486 tonnes, essentiellement due à un effet de mix énergétique de 40 059 tonnes. En outre, l'effet positif de la croissance démographique (+14 890 tonnes) est suivi d'un effet négatif du taux d'électrification (-11 743 tonnes). La population augmente, mais le taux d'électrification diminue : la croissance de la population électrifiée est donc faible. En ce qui concerne l'impact du groupe d'affluence, l'augmentation de la consommation d'électricité suivie d'une diminution du PIB entraîne un effet d'intensité énergétique positif. Ainsi, à mesure que le PIB et le taux d'électrification diminuent, l'effet du taux d'électrification lié à l'économie diminue également. Néanmoins, cet effet d'intensité énergétique (ΔC_e) passe par deux phases remarquables entre 1990-1992 : une baisse de -22 684 t CO_2eq de 1990 à 1991 suivie d'une augmentation de 25 979 t CO_2eq entre 1991 et 1992. Outre ses impacts sur la situation sociale du pays, la crise politique de 1991 a fortement affecté le développement économique de Madagascar [46] : le ΔC_e concerné est de -53 751 t CO_2eq ; à la fin de la crise, une reprise économique est observée, et le ΔC_e passe à 49 584 t CO_2eq .

De 1992 à 1997, l'impact environnemental du secteur de l'électricité est réduit de $-71\,862$ t CO₂eq. Bien que la contribution du groupe de population soit positive à hauteur de $88\,753$ t CO₂eq, l'aisance et la technologie ont des effets négatifs de $-48\,568$ t CO₂eq et $-112\,047$ t CO₂eq, respectivement. Au cours de cette période, la population et le taux d'électrification augmentent, de sorte que le nombre de personnes électrifiées augmente, entraînant une hausse de la demande d'électricité. Cependant, pour répondre à cette demande, il a été décidé d'augmenter la production hydroélectrique plutôt que la production thermique.

Pour la période 1997-2006, la tendance à la hausse des émissions de CO₂ du secteur de

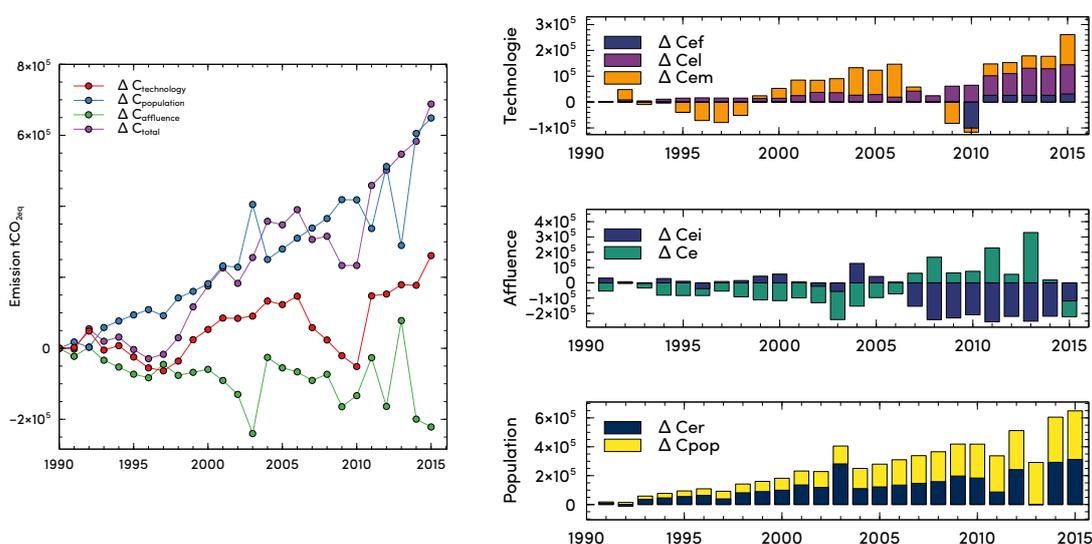


FIGURE 9.6 – Résultats de la décomposition additive des émissions de CO₂ liées à l'électricité de Madagascar, sur la base de l'année de référence 1990.

l'électricité reprend, atteignant une variation totale de $407\,424$ t CO₂eq, avec un effet de groupe technologique de $210\,303$ t CO₂eq, un effet de groupe d'affluence de $-21\,010$ t CO₂eq et un effet de groupe de population de $407\,424$ t CO₂eq. Comme la population est en constante évolution, la variation des émissions de CO₂ suit l'instabilité du mix électrique et de la situation économique. Le même schéma s'applique pour les périodes 2006-2010 et 2010-2015. Une diminution totale de $-157\,134$ t CO₂eq peut être observée entre 2006 et 2010, ce qui est dû à un effet de groupe technologique de $-198\,279$ t CO₂eq, un effet de groupe d'affluence de $-67\,052$ t CO₂eq et un effet de groupe de population de $108\,198$ t CO₂eq. Il s'ensuit une tendance à la hausse pour la période 2010-2015, avec un pic d'augmentation observable en 2011.

La variation totale des émissions de CO₂ pour 2010-2015 s'élève à $454\,800$ t CO₂eq, avec une contribution de $312\,629$ t CO₂eq pour le groupe technologique, de $-88\,354$ t CO₂eq pour le groupe d'affluence et de $230\,525$ t CO₂eq pour le groupe de population.

En conclusion, les combustibles fossiles ont joué un rôle de plus en plus important dans le mix électrique de Madagascar de 1990 à 2015. En conséquence, les émissions de CO₂ ont augmenté. Cependant, la situation socio-économique du pays a permis de contenir cette augmentation : Madagascar est un pays en développement avec un faible taux de croissance du PIB. Comme la consommation d'électricité est corrélée au PIB, cette situation de faible croissance limite la consommation et la production d'électricité du pays et donc l'impact environnemental du secteur de l'électricité. De plus, comme le taux d'électrification a été faible pendant les 25 années étudiées, la croissance démographique ne s'est pas accompagnée d'une extension du réseau de distribution d'électricité. L'interprétation des résultats révèle également que l'évolution du PIB par rapport à la population électrifiée est principalement corrélée à l'évolution du PIB par habitant. L'évolution du taux d'électrification n'a pas eu d'influence significative sur l'évolution du niveau de développement de Madagascar au cours de la période étudiée.

9.5 Cycle de vie des bâtiments

Le secteur du bâtiment est fortement associé à un impact environnemental élevé en raison d'une forte consommation d'énergie et de ressources naturelles [C.J Nwodo 2019]. Ce dernier est responsable de 43% de la consommation finale d'énergie en France. Le Grenelle a fixé l'objectif d'une réduction de 38% de la consommation d'énergie d'ici 2020. Il apparaît évident que l'évaluation de la qualité environnementale des espaces bâtis se prête naturellement à l'usage de l'ACV. Ainsi le bâtiment est analysé en quantifiant la consommation de ressources et la production de déchets à partir du flux amont d'extraction, de fabrication, de transport, de construction et d'utilisation des matières premières, et du flux aval de déconstruction et d'élimination en fin de vie [Pacheco-Torgal 2014].

L'utilisation de l'ACV pour évaluer la performance environnementale des matériaux et des bâtiments a considérablement augmenté au cours des dernières décennies. Dans la littérature, les études ACV montrent que les bâtiments ont un impact significatif sur l'environnement et que la construction de bâtiments consomme environ 50% des matières premières, 71% de l'électricité, 16% de la consommation d'eau et produit 40% des déchets mis en décharge [Oduyemi., O, Okoroh., M.I, Fajana. 2017]. Les bâtiments offrent cependant le plus grand potentiel d'atténuation des impacts environnementaux. Un projet de construction peut avoir différents niveaux d'impacts environnementaux à différents stades du cycle de vie d'un bâtiment [E. Malia and G. Lewis 2013].

Ainsi, la nécessité d'une base de données régionalisées apparaît comme évidente. Les premiers résultats que nous présentons ici sont issus des travaux de thèse de Leslie Ayagapin. Les éléments que nous nous proposons d'aborder et de discuter le surcôt environnemental du à l'éloignement, la définition de la typologie des habitats. Enfin nous aborderons, la question de la fin de cycle de vie à travers la définition de la durabilité d'un bâtiment.

9.5.1 Contexte et méthode

Bien construire est un enjeu majeur pour notre société dès aujourd'hui. En effet la rareté des ressources et la nécessité d'une certaine frugalité énergétique induisent le fait qu'il soit nécessaire d'évaluer le bâtiment à différentes étapes de son cycle de vie afin d'objectiver des stratégies de construction. Bien que le secteur de la construction soit parmi les plus dynamique, la Réunion accuse toujours un certain retard dans l'offre disponible de son parc locatif. En effet, selon une récente projection de l'INSEE sur les besoins en logements à l'horizon 2035, entre 124 800 à 187 800 seraient à construire de 2013 à 2035 soit une moyenne de 7700 logements par an. De plus le parc locatif social compte un certain nombre de bâtiments qui tendent vers leur fin de vie. Il faudra alors envisager des réhabilitations ou de nouvelles constructions. L'ACV semble donc bien être un outil intéressant pour orienter ces futurs choix.

Les travaux se sont intéressés à différentes frontières, nous permettant de questionner divers aspects des impacts environnementaux d'un bâtiment.

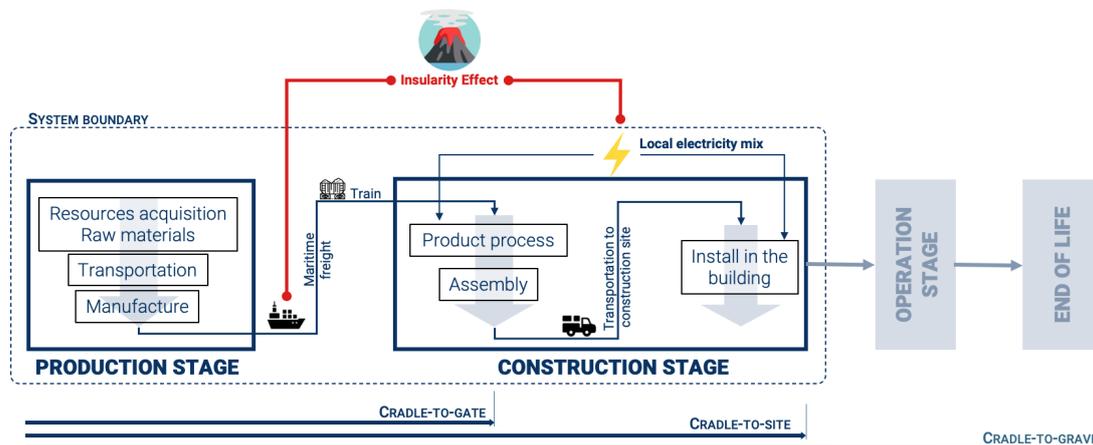


FIGURE 9.7 – Frontières de nos études en ACV du bâtiment.

La Figure 9.7 présente les différentes frontières à considérer dans nos études. Notre première approche a été une analyse de type *cradle-to-site*. Cette étape nous a essentiellement permis de mettre en valeur trois points majeurs :

- Construire une base de données fiable et régionalisée des matériaux utilisés dans la construction locale ;
- Définir et caractériser les typologies des logements individuels ou collectifs ;
- Mettre en évidence le "**surcout**" environnemental dû à notre situation géographique.

La seconde phase a été celle du fonctionnement, en effet les choix de matériau lors de la phase de construction peuvent avoir des conséquences dans les consommations énergétiques. Cependant, une analyse fine de la phase de fonctionnement est nécessaire, car elle correspond aux usages et modes d'habiter de la population. Ainsi, un bâtiment même "bien" construit, trouve tout son sens dans son usage, et, s'il est utilisé de façon adéquate. Il y a donc à quantifier les flux de matières et d'énergie qui passent au travers du système, et à les mettre en

correspondance avec les pratiques des usagers.

Enfin la dernière étape qui est celle de la fin de vie, nous la discuterons à la fois sous l'angle des déchets mais également de la durabilité du bâtiment. Sur la base de l'état de l'art, les catégories d'impact évaluées sont les suivantes

- GWP kg CO₂eq;
- Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques pour les ressources non fossiles kg Sbeq;
- Potentiel d'acidification kg SO₂eq;
- Pollution de l'ozone troposphérique (kg);
- Composés organiques volatiles non méthaniques (kg).

La Figure 9.8 nous présente une projection des principaux matériaux sous la forme des émissions totales de ces derniers en fonction de son facteur d'émission. Ainsi on peut voir qu'à l'exception de la porte en aluminium, la plupart des matériaux ont un FE inférieur à 200 kg CO₂eq. La distribution est toutefois plus hétérogène concernant les émissions totales. On note ainsi que les matériaux ou produits à faible émission sont peu utilisés (en quantité). On peut concentrer par nos efforts à trouver des alternatives sur des produits tels que les enduits, bloc américain ou dallage qui sont parmi les plus impactants lors d'une construction.

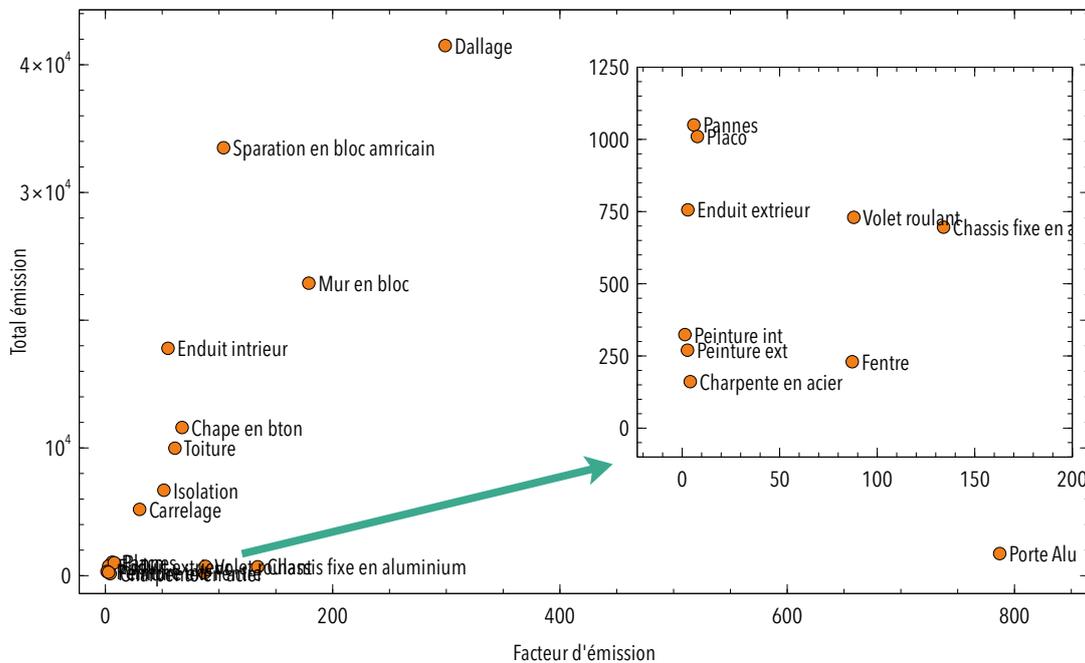


FIGURE 9.8 – Impact des matériaux pour les maisons individuelles selon le GWP.

9.5.2 Quelle typologie des constructions individuelles à la Réunion

En amont, de l'analyse complète du cycle des maisons et immeubles, nous avons évalué sur un échantillon de 38 maisons récemment construites. La méthode de classification a été reprise des approches présentées dans le chapitre d'analyse de données. Nous avons ainsi effectué une classification ascendante hiérarchique sur composantes principales.

Avant de recourir au clustering, nous avons évalué la tendance au regroupement de notre jeu de données. Pour ce faire on a recours à la statistique de Hopkins, noté H . Cette dernière évalue le "caractère spatial" des données [Lawson 1990]. L'indicateur se calcule de la manière suivante :

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i} \quad (9.5)$$

Où $x_i = \text{dist}(p_i, p_j)$ représente la distance entre deux individus voisins p_i et p_j , [Han 2012]. Et y_i mesure la même chose à partir d'un tirage aléatoire. Ainsi nous avons obtenu $H_{data} = 0,321$ et $H_{random} = 0,574$ ce qui signifie que notre jeu de données n'est pas uniformément distribué, et il y a donc des regroupements significatifs. L'étape d'ACP nous a permis de vérifier la structure de notre jeu de données. L'analyse des résultats n'a révélé aucun individu singulier. L'inertie des axes factoriels suggère de se limiter aux deux premières composantes car celles-ci expriment 91,06% de l'inertie totale de l'ensemble des données. En effet, conformément au critère de Kaiser [Kaiser 1960], nous avons uniquement les composantes dont la valeur est supérieur à 1. Le calcul des valeurs propres donne pour la 3^e composante, $\lambda = 0,426$.

Ainsi, nous voyons très clairement que les logements collectifs constituent un groupe (*Cluster 3*) à part voir Figure 9.9. Ce cluster concentre de grandes valeurs sur le NMVOC, AP et le TOPP, ce qui s'explique en grande partie par l'usage d'une grande quantité de béton pour ces immeubles. Concernant les maisons individuelles, deux clusters se distinguent : le *Cluster 2* représente les maisons avec le moins d'impact. L'un des éléments qui va le plus impacté les maisons est le nombre d'ouvertures (portes, fenêtre) car ces dernières sont en aluminium. De plus, les cloisons internes sont en parpaing, alors dans le cas du cluster 1 ce sont des parois en placoplâtre qui ont été privilégiées.

Ainsi, dans le cadre de la thèse de Leslie Ayagapin, nous avons précisément évalué les matériaux et produits utilisés à la Réunion dans cette optique. En effet, une seconde étape importante des travaux que nous menons porte sur l'optimisation des choix de matériaux dans le cas l'objectif d'une réduction significative des impacts dans la phase structurelle du bâtiment. Cela nous amènera progressivement à redéfinir la notion de durabilité du bâtiment sur laquelle je reviendrai dans la partie traitant des perspectives de mes travaux.

9.5.3 Impacts, effet d'insularité et politiques

De récents travaux que nous avons menés sur les maisons individuelles avaient pour objet principal d'évaluer un possible "surcoût environnemental" du fait de notre situation géographique. Nous avons ainsi, mené dans un premier temps une étude comparative à l'échelle des matériaux puis à celui du bâtiment proprement dit.

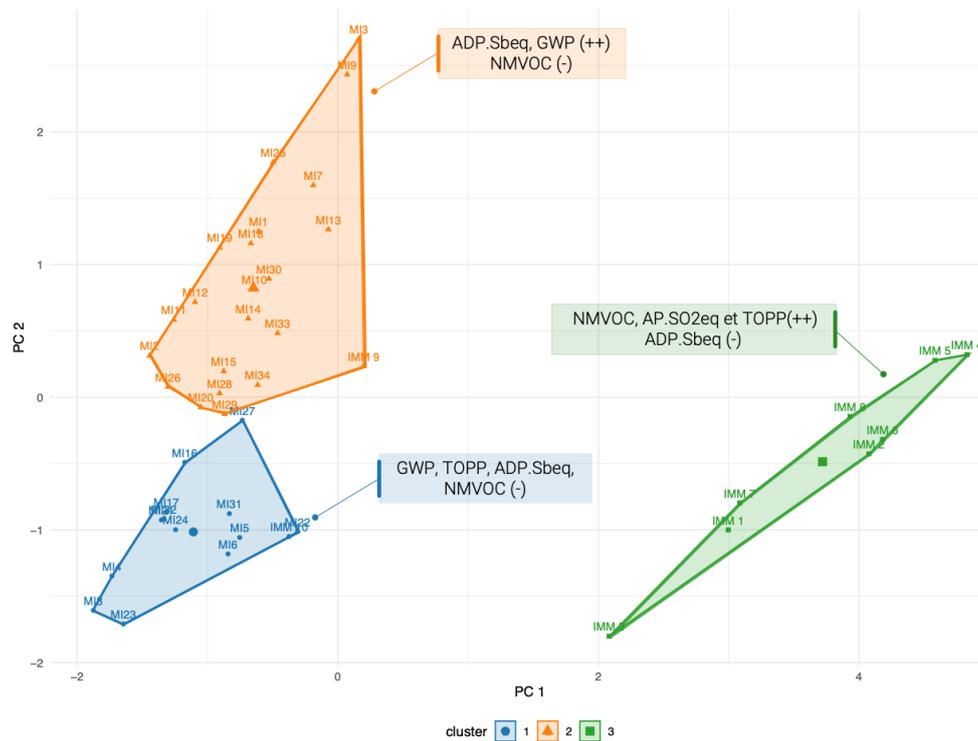


FIGURE 9.9 – Classification des constructions individuelles et collectives de la Réunion.

Dans leur phase de construction en particulier le gros oeuvre, le béton a été identifié comme ayant le plus grand impact sur l'acidification, l'eutrophisation et le GWP. En effet, dans chaque catégorie d'impact, ce dernier s'est avéré prédominant par rapport aux armatures en acier par exemple. Le béton a également un impact plus important dans chaque catégorie d'impact. Son impact varie entre 35 et 50% de l'impact global de la maison individuelle tant en France métropolitaine qu'à la Réunion. Plus de la moitié de l'impact du béton est lié à l'utilisation et à l'intégration du ciment parmi ses composants. Dans le cas de la Réunion, une partie des composants du béton est importée, et le béton est fabriqué localement. Cet aspect justifie grandement les nombreux travaux actuellement en cours sur de nouveaux types de béton. Dans le laboratoire, de récents travaux de Bruno Malet-Damour s'attachent à l'intégration de nouveaux composants dans les mélanges de béton. Les études récentes de [Mohammed 2019] montrent que les premiers résultats avec des agrégats de PVC sont prometteurs avec des mélanges à 30% qui ne changent pas grandement les propriétés du béton frais. Toutefois, comme le souligne [Shepherd 2020], encore de nombreuses recherches devront caractériser le comportement de ce type de béton dans le temps et cela nécessitera la mise en oeuvre de nouvelles méthodes d'essai.

Dans le cas de la Réunion, les produits et matériaux nécessitant une transformation en local sont ceux qui voient augmenter leur impact de façon significative. Compte tenu de la qualité du mix électrique et de l'éloignement, les impacts deviennent très vite importants. C'est donc pour cette raison que nous avons souhaité cet impact particulier dû à notre condition

d'espace insulaire ; que nous avons appelé "*Effet d'insularité*".

Se référer à l'insularité, c'est mettre l'accent sur l'isolement et la spécificité et parfois même la singularité. Un territoire insulaire présente une organisation spatiale originale ; ayant ses limites géophysiques, l'insularité fait référence aux limites géographiques du territoire, à un stock limité de ressources, et à la fragilité des espèces endémiques soumises à une pression anthropique très localisée [Simon 2008]. Depuis les années 1950, la Réunion s'est engagée dans un processus de rattrapage économique par rapport à la France. Dans le même temps, elle n'a pas encore achevé sa transition démographique, ce qui a créé un besoin de logements et de bâtiments sur l'île [Bénard-Sora 2016]. Le secteur de la construction sur l'île rencontre souvent des contraintes liées à l'indisponibilité des ressources immédiates ; en d'autres termes, il est fortement dépendant des importations maritimes.

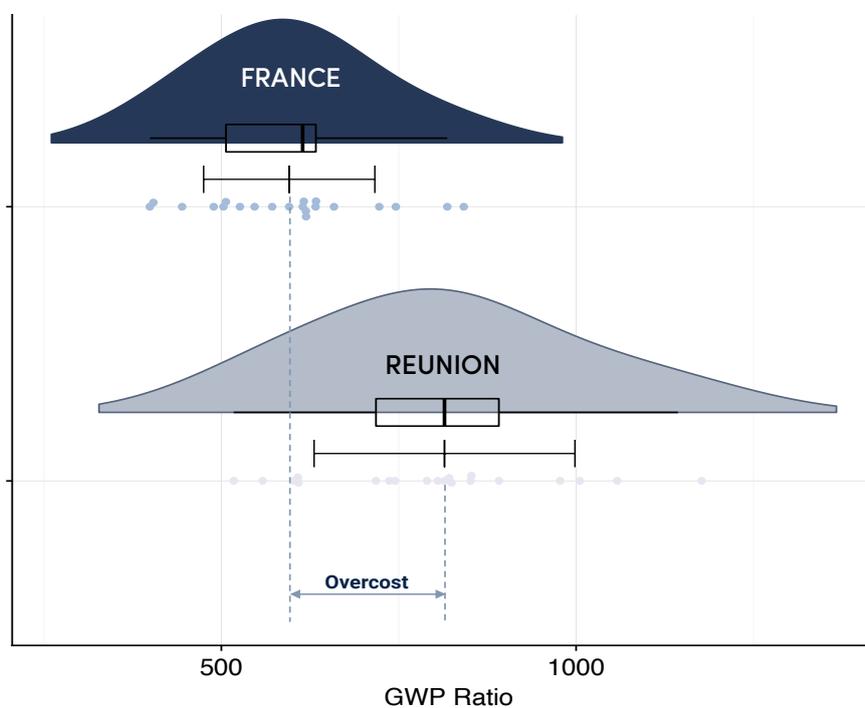


FIGURE 9.10 – Comparaison de la distribution du GWP des maisons individuelles.

L'une des contraintes importantes de l'insularité est l'importation de matières premières ou de produits. Comme la grande majorité des matériaux de construction sont importés (380 millions de tonnes à la Réunion en 2014), le transport représente une part importante de leur coût environnemental et économique. Comme évalué dans l'étude de Zhang, [Xiaoling, Zhang., Liyin, Shen., Lei 2013], le transport en haute mer a un facteur d'émission de 15,98 g/t.km de CO₂ par rapport au fret routier qui peut atteindre 168 g/t.km de CO₂. Cependant, les longues distances d'importation pour le transport maritime (Europe, Asie) entraînent une augmentation des impacts totaux. La Figure 9.10 montre les résultats de la distribution du ratio GWP. Dans l'ensemble, il apparaît qu'il existe un surcoût environnemental dans le secteur de la construction à la Réunion. Le deuxième aspect est que les

pratiques de construction à la Réunion sont plus variées. Il en résulte une plus grande dispersion de la distribution qu'en France. L'assemblage ou la fabrication locale des produits entraîne également un surcoût environnemental. En effet, le mix électrique est encore fortement dominé par les énergies fossiles.

Depuis plus de dix ans, la part des énergies renouvelables à la Réunion dépasse à peine 35%. Ce mélange à forte teneur en carbone a un impact sur toutes les étapes de la production des maisons (fabrication des produits, construction). La figure 9.11 montre la part représentative de l'effet de l'insularité lors de l'évaluation de l'impact environnemental d'une maison résidentielle. L'effet de l'insularité est visible dans la part du mix électrique et la part du transport maritime. Comme prévu, il semble évident que l'éloignement aggrave l'impact de ces apports exogènes de matériaux ou de produits de construction. Ainsi, en raison de l'isolement pour disposer des matériaux en quantité suffisante, il est nécessaire de recourir au stockage, ce qui peut induire un surcoût environnemental.

Le choix de l'origine des produits ou des matériaux de construction qui ont été utilisés pour construire ces maisons individuelles en France et à la Réunion a permis d'expliquer dans un premier temps que, selon l'emplacement des maisons, le type et la distance de transport sont "spécifiques", en fonction de la disposition de la maison. Dans le contexte continental, le choix des produits, des matériaux de construction et des importations n'est pas le même que celui de l'environnement tropical, ce qui fait automatiquement du transport maritime l'un des principaux moyens de fret. Le transport des matériaux sur le chantier de construction a des impacts environnementaux inhérents à la consommation d'énergie et aux émissions de GES associées au mode de transport, comme les camions, les navires ou les avions.

Toutefois, dans notre cas, en raison de la petite taille de l'île (63 km de long et 45 km de large), nous avons supposé que le transport routier était négligeable. L'impact du transport maritime

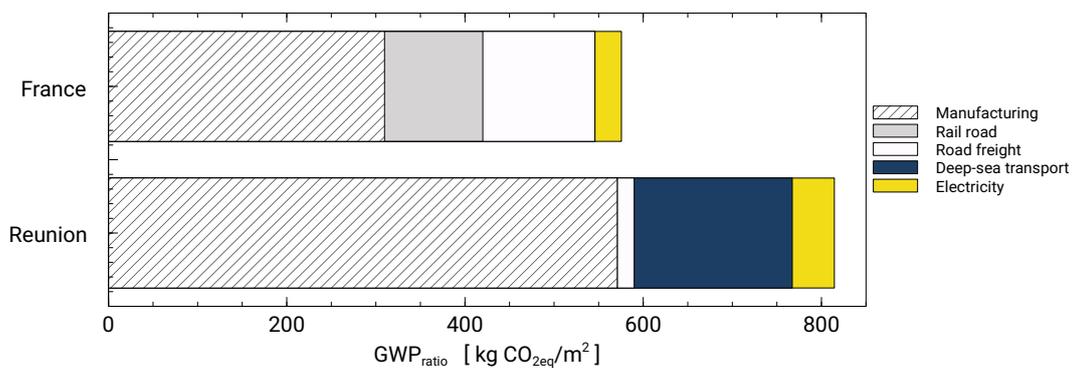


FIGURE 9.11 – Part du mix électrique et du transport dans le ratio de GWP.

est plus marqué pour la Réunion, qui présente une contrainte géographique et une indisponibilité de la majorité des ressources en matières premières. Une grande partie des produits et matériaux de construction sont importés de Chine, d'Europe, d'Italie, d'Indonésie, etc. En outre, le mix électrique local, qui a un impact GWP minime pour la France, a un impact majeur sur la Réunion. La part importante de l'énergie nucléaire dans le mix électrique français

et la part importante des combustibles fossiles dans le mix électrique réunionnais expliquent ces résultats. La plupart des études d'ACV mettent souvent en évidence l'effet du transport maritime sur l'impact total. Nos résultats apportent une nuance frappante. En effet, les études des bâtiments visent à identifier les étapes les plus impactantes et proposent des aides à la décision pour les stratégies de réduction des émissions associées. En plus du transport, notre étude met en évidence l'impact significatif induit par la chaîne de processus extraction - fabrication exogène - transformation locale.

Ainsi, il est assez surprenant de constater que l'effet de l'insularité est davantage mesuré par la chaîne de processus, qui représente respectivement 70% et 54% du GWP pour la Réunion et la France. En outre, la part du transport ne dépasse pas 22% à la Réunion. On peut donc clairement affirmer que la question de l'insularité ou de l'isolement géographique est davantage abordée à travers le prisme du paramètre de fabrication. Ceci apporte donc une nouvelle perspective sur la réduction du surcoût environnemental en reconsidérant tout d'abord les sources d'approvisionnement en matières premières et produits. Il est également possible d'envisager de nouvelles façons de construire des bâtiments ou de traiter des matériaux moins polluants pour l'environnement.

9.5.4 Quelles conséquences pour la politique énergétique ?

Le secteur du bâtiment à La Réunion est un enjeu crucial avec une population qui augmente de 10 000 personnes chaque année. La demande de nouveaux logements est de l'ordre de 9 000 par an. Ainsi, ce secteur est marqué par un important flux d'importation et, par conséquent, une industrialisation marginale. Une récente étude économique met en évidence un surcoût d'environ 39% des matériaux de construction par rapport à la France métropolitaine. En plus de ce surcoût, le rapport a montré l'incohérence des normes réglementaires nationales spécifiques aux usages et au contexte du climat subtropical. La France fait actuellement évoluer sa réglementation thermique RT2012, vers une nouvelle réglementation environnementale RE2020. Cette réglementation intègre le label préfigurant des bâtiments économes en énergie E+, et à faible émission de carbone C-. En 2009, une réglementation thermique spécifique à l'outremer RTAADOM a été créée pour prendre en compte le contexte climatique subtropical. Le schéma de la dimension environnementale dans le RE2020 est actuellement encore en cours d'élaboration. Cette phase s'appuie sur le retour d'expérience de 1007 bâtiments en construction afin de calibrer les seuils de performance souhaités. Il est donc crucial de disposer d'une réglementation environnementale adaptée aux régions d'outremer. Notre étude a clairement mis en évidence un coût supplémentaire de 200 kg CO₂eq/m², soit environ 37% de plus. La définition des seuils de performance devra donc nécessairement tenir compte de cette première lacune que nous avons observée dans ce travail.

Par rapport au résultat actuel de la Réunion, qui est de 814 kg CO₂eq/m², il est clair qu'un effort considérable devra être fait pour se rapprocher de ces niveaux de performance environnementale. Au vu des résultats, les recommandations suivantes seront élaborées : Des améliorations à court terme peuvent être apportées grâce à la décarbonisation du mix électrique. Selon les scénarios développés dans les recherches de Rakotoson [Rakotoson 2017, Rakotoson 2018], le facteur d'émission du mix électrique réunionnais de-

vrait diminuer à 420 g CO₂eq/kWh. Ainsi, cette décarbonisation du mix ne réduit le rapport GWP de la maison que de 17 kg CO₂eq/m². Il s'agit d'un effet très marginal par rapport aux objectifs de réduction des émissions de GES. Le deuxième levier, qui concerne l'industrie du transport maritime, est davantage un problème mondial. Ainsi, à l'échelle de la Réunion, il n'y a pas d'implications politiques spécifiques à définir car le poids du territoire dans la décision globale est quasi nul. La réflexion actuelle fait apparaître deux types de mesures :

- Le premier aspect est de nature plus technique, qui vise à améliorer les composants du bateau et aussi l'optimisation énergétique dans la phase opérationnelle, [Olmer 2017].
- Le deuxième point concerne l'intégration des énergies renouvelables pour la production d'électricité mais aussi une transition vers des carburants sans carbone.

Les normes de construction françaises et européennes imposent l'importation d'une certaine quantité de produits en provenance d'Europe. La Réunion a déjà défini une implantation adaptée de ces bâtiments au climat tropical. Ces efforts doivent maintenant être soutenus et étendus aux méthodes de construction. En effet, dans le contexte d'une économie insulaire, les déchets du secteur du bâtiment s'avèrent problématiques, entraînant une pression environnementale supplémentaire. Les politiques doivent agir de toute urgence en adoptant une chaîne de valeur de recyclage des produits de construction afin d'encourager la réutilisation des matériaux autant que possible au niveau local. Cette ambition conduit à la question du choix de matériaux totalement ou partiellement réutilisables.

9.5.5 Cycle de vie, déchets et durabilité

Nous avons abordé dans un premier lieu les résultats d'une première analyse du cycle de vie du bâtiment dans sa phase construction. Hors l'ACV, nous permet d'appréhender le bâtiment dans son l'ensemble de son cycle i.e. Construction – Exploitation – Fin de vie. Dans la phase d'exploitation nous devons considérer deux types de flux *Matières* et *Énergie*. Ces différents flux ont des impacts environnementaux, mais peuvent aussi être considérer comme un gisement énergétique selon la Figure 9.12.

Ainsi le flux de déchets sortant lors de la phase d'exploitation correspond aux ordures ménagères résiduelles (OMR). Le chiffre moyen français est de 254 kg/hab.an. Aujourd'hui, du fait, de l'hétérogénéité d'une poubelle, il n'existe pas d'études permettant de quantifier véritablement le potentiel énergétique des OMR. Toutefois, des études expérimentales au sein de notre laboratoire visent à qualifier le pouvoir calorifique des OMR. Ce potentiel représente un gisement de production d'électricité qui serait dans l'avenir susceptible de compenser, voire même effacer la demande en électricité. Nous avons effectué nos calculs sur la base d'une durée de vie de 30 ans. Ainsi, on obtient un impact total pour le GWP de l'ordre de 42 000 kg CO₂eq/m². De ce fait, la part construction et démolition du bâtiment ne représente que 3% du total d'émission.

Ces résultats nous éclaire en plusieurs points sur les questions a se poser. En effet, compte tenu de la faible part de la construction et démolition, cela a-t-il vraiment du sens de concentrer nos efforts sur la mise en oeuvre de matériaux et produits plus écologiques? Ne doit-on pas en revanche se focaliser sur la phase d'exploitation? Il s'ouvre à nous de nombreuses

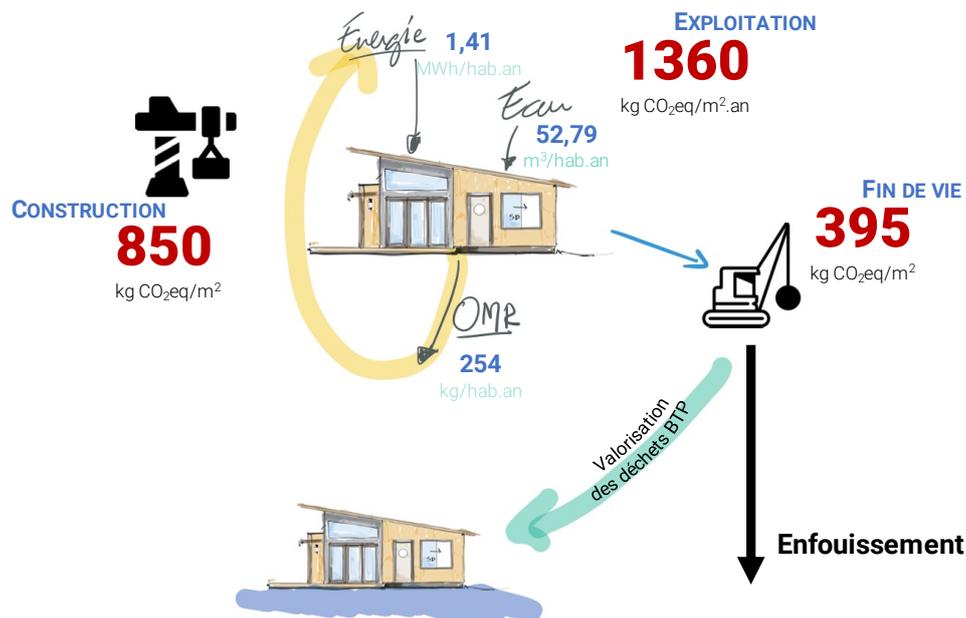


FIGURE 9.12 – Schéma du cycle vie global de la maison.

pistes de travail, que nous avons déjà initié dans les travaux de thèse de Leslie Ayagapin. En effet, nous nous sommes focalisés sur deux aspects particuliers :

- Consommation électrique | nous étudions l'impact de la décarbonation du mix électrique mais également des changements des usages en terme d'intensité énergétique ;
- Choix des matériaux | Cette étape permet de diminuer l'impact mais aura surtout des conséquences sur la phase de démolition.

Les travaux en cours s'attachent à évaluer l'impact des différents scénarios de décarbonation et de changement d'usage sur les différents impacts. Le deuxième élément concerne la valorisation des déchets issus de la fin de vie du bâtiment. Actuellement, les chiffres du BTP à la Réunion ne sont pas tout à fait consolidés concernant la filière de valorisation des déchets. A ce jour la déconstruction et la réhabilitation représente près de 90% des déchets. Les 7% restant sont issus des constructions neuves. Ces déchets sont répartis de la manière suivante :

- 73% déchets inertes (gravats, béton, tuile...);
- 22% déchets non dangereux (plâtre, bois, plastiques...);
- 5% déchets dangereux (amiante, solvants...).

Selon le rapport [CERBTP 2019], on estime que la production de déchets issus du bâtiment à **351 kt** à la Réunion. Le taux de valorisation en 2017 est de 57% ce qui se rapproche de l'objectif de 70% fixé dans la LTECV. Cela nous permet de poser ici les nouvelles bases de la durabilité du bâtiment.

Ainsi, il semble aujourd'hui primordial de devoir mieux clarifier les concepts et les objectifs d'une économie circulaire dans l'environnement des espaces bâtis. Cela demande dans un premier temps de sensibiliser les acteurs du secteur BTP. Cela nous amène naturellement

à redéfinir la notion de *durabilité* des bâtiments. En effet, les bâtiments dits durables ont eu pendant longtemps pour objet de donner la priorité aux enjeux de confort thermique, de sobriété énergétique, intégration de ressources renouvelables, etc. Se dessine ainsi, naturellement une nouvelle approche de la durabilité en lien avec des contraintes environnementales. La durabilité du bâtiment peut s'entrevoir dans la capacité à renouveler les matériaux d'une construction. On se doit de donner la priorité à la conception de systèmes et de matériaux issus de la valorisation des déchets. Cela permet de prolonger la valeur et la durée de vie utile des ressources utilisées.

Cette nouvelle approche de la durabilité des bâtiments demande une planification plus globale des projets qui devront avoir une approche systémique de chaque étape du projet. On devra ainsi tenir compte des flux de matériaux, d'énergie, des critères de démolition du bâtiment et surtout des matériaux en second cycle de vie pour qualifier la durabilité d'un bâtiment.

A la Réunion près de 75% des entreprises du bâtiment ne connaissent les circuits de vente de produits recyclés du BTP. 11% de ces mêmes entreprises objectent des raisons de sécurité à la non utilisation de ces produits recyclés. La société VALORUN qui valorise ses déchets indique un taux de recyclage proche de 80% pour 180 tonnes de déchets collectés chaque année. Une fois traité, les produits disponibles sont deux fois moins coûteux que le produit d'origine "neuf". Chaque jour sur ce centre seul 70 000 tonnes de produits sont vendus soit moins de 39% de la capacité totale. Il faut donc impérativement sensibiliser les acteurs du secteur de la construction. Plusieurs leviers devront être mis en place :

- Sensibilisation et formation des maîtres d'oeuvre et d'ouvrage sur l'intérêt de ses produits, et pouvoir garantir la qualité des produits pour les ouvrages ;
- Prescription dans les marchés que l'un des critères sera la part de matériaux recyclés ;
- Tracabilité des déchets grâce un BSD² obligatoire pour tous, afin de résorber les dépôts sauvages et rendre obligatoire la valorisation des déchets avec des points de collectes intermédiaires sur le territoire.

Le gouvernement a mis en place en décembre 2019 la Loi 2020-105 anti-gaspillage [française 2020], permettant aux entreprises des ramener gratuitement leurs déchets si ces derniers ont été correctement triés en amont. Cela préfigure donc de ce que devraient être les usages au sein de ces entreprises dans un futur proche afin de préserver les ressources naturelles en particulier dans le cas de situation insulaire disposant de peu ressources³.

9.6 Synthèse

La durabilité environnementale est un sujet d'intérêt croissant qui a apporté sa juste part d'études au cours des quatre dernières décennies. La prise de conscience de la pression de notre activité anthropique sur l'environnement a nécessairement amené à l'élaboration d'un cadre normalisé permettant l'évaluation. Ainsi les émissions de GES ont émergé comme un indicateur incontournable de notre impact.

2. Bordereau de suivi des déchets

3. Des estimations dans le secteur TP indique une pénurie probable en gravats d'ici 5 ans à la Réunion.

Cet indicateur est aujourd'hui largement utilisé, toutefois les conclusions associées peuvent s'avérer cavalières si des précautions ne sont pas prises quant à la définition du périmètre d'étude et de l'objectif de l'étude. En effet, trop souvent les analyses environnementales sont prises comme outil de décision, hors l'ACV ne concoure qu'à apporter un critère environnemental dans la mise en oeuvre d'un projet. Il faut alors faire correspondre les problématiques techniques, économiques, sociétales, de durée de mise en oeuvre, etc. Toutes les stratégies de mise en oeuvre peuvent être pertinentes, mais elles sont plus adaptées à l'objectif général de fournir aux décideurs des informations compréhensibles sur la durabilité environnementale de leur projet.

À cet exercice de planification environnementale, il faut associer une approche prospective qui permet alors d'intégrer les outils non pas au prisme d'une contrainte, mais plutôt une ambition à atteindre. L'objectif général sera de définir quelles conditions va nous permettre de réaliser nos ambitions d'un nouveau développement plus sobre et qui respecte la feuille de route fixée par la France.

Finalement, nous voyons bien que cela est au sein de l'énergie, de la ville, d'un bâtiment l'évaluation environnementale prend une place grandissante. On se doit donc d'être vigilant à la qualité des données associées, ce qui explique l'importance de la régionalisation des données. L'objectif de nos travaux est d'avoir un niveau de détails important dans notre inventaire de cycle, mais d'aboutir à terme à des configurations, ratios type permettant aux différents acteurs de la construction de facilement mettre en oeuvre une analyse environnementale d'un système.

VALORISATION – 4 articles, dont 1 en évaluation. Les travaux menés ont reçus le financement de deux projets : RESET, ERASMUS+, ANR (en cours d'évaluation).

ENCADREMENT – J'ai encadré une thèse soutenue celle Vanessa Rakotoson et une thèse est en cours sur l'ACV des espaces bâtis

FORMATION – Le cours d'ACV a intégré à notre formation. Je participe au cours d'outils d'analyse environnementale (L1) - J'ai construit les UEs d'ACV pour les formations de M2 GC-SC, VEU et GC-STP(Maurice).

Conclusion et perspectives

LES travaux exposés dans les différents chapitres ont permis d'apporter une lecture thématique et quasi chronologique des axes de recherche que je porte actuellement au sein du laboratoire PIMENT depuis mon recrutement.

La question de la transition énergétique est un enjeu majeur de notre société et un défi qu'il nous faut réussir au plus tôt. D'une transition planifiée, nous pourrions être amenés à vivre une révolution qui demandera une adaptation rapide de notre société aux contraintes de notre environnement et entraînera un changement radical de nos pratiques. À l'instar de la transition énergétique, mon mémoire a mobilisé des champs disciplinaires et des échelles d'intervention variées, allant de l'utilisateur au territoire en passant par différents systèmes complexes que sont les Enrs, les bâtiments, la ville, etc.

Un des points de départ de ma réflexion a été de m'attacher à d'abord comprendre mon environnement à travers les informations qui me parviennent ou que j'ai pu produire. Cette étape peu abordée au sein de notre laboratoire constitue un axe de recherche important à la compréhension des enjeux. En effet, aujourd'hui nos problématiques de recherche doivent avoir la porosité nécessaire et suffisante qui permettra une mise en conversation avec d'autres disciplines. Cela nous permettra de comprendre les enjeux, d'identifier les contraintes, les acteurs, etc., et ainsi construire les conditions initiales et les conditions limites nécessaires à la définition du modèle censé représenter notre système d'étude.

Le premier élément qu'il nous a semblé judicieux d'étudier a été l'échelle de l'utilisateur qui est le premier acteur des bâtiments, quartiers et des villes qui sont petit à petit transformés. Ainsi, nous avons l'importance de la compréhension de la population face à des enjeux primordiaux. Nos travaux ont montré l'intérêt dans le cadre du développement de projets sur le territoire d'y inclure la population, en évitant un déploiement de technique et de pratiques qui pourraient ne pas correspondre aux attentes locales.

Cela se mesure aujourd'hui dans de nos nombreux projets d'écoquartier de la Réunion où l'usage des espaces n'est celui attendu lors des phases de projet. On peut ainsi dire qu'il y a une persistance des usages, et ce malgré une reformalisation des espaces publics ou privés. Cela nous ramène donc au mode d'habiter local, qui nous questionne beaucoup dans l'ambition d'une ville durable tropicale. En effet, une fois la question de la conception (confort, architecture) abordée, de l'impact environnemental des activités associées, que penser dès

lors de l'appropriation de ces espaces par la population? Comme peut-on imaginer une évaluation de qualité, de la réussite d'un projet d'écoquartier, d'un renouvellement urbain, etc.? Cette question constitue une future étape de travail sur laquelle nous devons nous pencher afin d'analyser la perception des usagers, et comprendre quels sont les facteurs qui permettent d'aboutir finalement à une acceptabilité et une appropriation des projets par les usagers.

Le second élément qui fait écho à la nécessité de comprendre les mutations de nos territoires et la volonté de l'évaluation concerne l'analyse des données. Cet aspect que je développe avec ma collègue Fiona Bénard, a eu pour objectif principal de nous approprier un ensemble d'outils et méthode qui nous aideraient dans les analyses à mener. Cela nous a permis de définir une méthodologie applicable à diverses disciplines dans l'optique de la mise en oeuvre d'indicateurs spatiaux ou temporels. Ainsi, dans l'objectif d'observation et de mesure de la transition il nous faut encore approfondir la définition de ces indicateurs afin d'aboutir à un formalisme générique aisément reproductible. Ce choix est une autre orientation que nous avons souhaité porter au sein du laboratoire où finalement l'objet de notre recherche reste et demeure "*le réel*".

Classiquement, nous cherchons au sein du laboratoire à représenter des phénomènes physiques au sein de systèmes complexes. Toutefois, il n'est pas toujours facile à certaines échelles (le territoire par exemple) d'identifier une formulation d'une observation que l'on souhaite. Notre démarche est donc plus exploratoire, dans la mesure, où l'on souhaite analyser de l'information d'un jeu de données, sans prétendre à priori savoir le résultat auquel on doit aboutir. La philosophie est de fait très différente, mais totalement cohérente avec des approches plus cartésiennes, développées à PIMENT.

Ces phases d'analyse constituent en quelque sorte une approche de type de notre environnement. Dans la continuité, nous avons initié au sein du laboratoire la démarche prospective dans le cas de la transition. En effet, deux aspects fondamentaux se sont côtoyés la maîtrise de l'énergie, et production énergétique renouvelable. Par conséquent, compte tenu de l'expérience du laboratoire sur ces aspects, il m'a semblé plus opportun de changer d'échelle de temps et d'espace. C'est donc pour cette raison que nous avons amorcé la prospective à la fois temporelle et spatiale afin de construire les futurs possibles que nous devons essayer d'atteindre selon les externalités existantes dans nos territoires. Les travaux que nous allons développer porteront essentiellement sur les pays de la zone OI. Notre démarche est de permettre de définir des trajectoires sur les espaces insulaires et d'arriver à mettre en oeuvre ces pas vers la transition dans l'Indianocéanie. Grâce au programme FESTII nous avons pu déjà collaborer avec les différents chercheurs de la zone travaillant sur divers aspects de la transition. Notre objectif à travers l'appui à la formation est de constituer un groupe de chercheurs de la zone qui porteront les ambitions de recherche dans le cadre de la transition énergétique.

L'objectif majeur de la prospective que nous avons amorcé est de poser le cadre de nos modèles autour d'environnements entièrement Open source. Le modèle **SARI** et **MAMBA**

représentent les premières étapes de développement, les phases d'optimisation porteront d'abord sur une approche globale de production. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre de prospective, l'aspect de valorisation des déchets dans le PRERURE¹ n'a pas fait l'objet d'une attention particulière. Les études du gisement des déchets ont mis en évidence une capacité conséquente, qui s'affranchit des problématiques d'intermittence. Je souhaiterais dans la continuité développer les modèles en lien avec le transport. En effet la décarbonisation du secteur du transport, va nécessiter une approche sur la définition des stratégies les moins impactant économiquement. Nous envisageons une optimisation de la production sans stockage au fil de la ressource.

Enfin, un dernier volet que je souhaite développer est en lien avec l'analyse de cycle de vie. En effet, nous avons développé des travaux en lien avec l'énergie et une thèse en cours traite de l'impact matériaux et bâtiments à la Réunion. Ce travail va s'étendre à une approche plus holistique qui sera celle du métabolisme territorial. L'objet de ce développement sera de mobiliser nos approches classiques d'analyse de flux de matière, énergie et information afin de modéliser le fonctionnement d'un espace bâti. Là encore notre objectif est d'apporter une lecture nouvelle sur la notion de durabilité des bâtiments ou des villes. L'idée générale sera de redéfinir les contours de cette durabilité au prisme des résultats obtenus et en mettant en lien les travaux menés au sein des autres chapitres. Je souhaiterais pour cela développer le couplage entre les modèles SARI/MAMBA, ACV et BIM afin de considérer tous les aspects de la vie d'un projet; de sa mise en oeuvre à sa fin de vie.

L'ensemble des chapitres que j'ai abordés ont permis de mettre en lumière la cohérence de mes travaux de recherche dont l'objectif final est de comprendre les mécanismes de la mise en oeuvre d'une transition écologique. Cette compréhension a mis en évidence la nécessité de croiser les échelles d'intervention ainsi que les champs disciplinaires. Cette approche trouve ses bases dans l'analyse systémique qui nous permet de représenter des systèmes complexes par un sous ensemble de systèmes plus facile à décrire. Ainsi les lois permettant de représenter les phénomènes ne sont pas uniquement issues de la physique, mais se basent également sur la définition de métamodèle issu de l'analyse de données. Ces travaux sont donc les jalons de nouvelles perspectives en cours à venir sur cet enjeu de la transition écologique :

- Dans un territoire contraint comment faire se côtoyer des enjeux d'autonomie énergétique, d'autosuffisance alimentaire, d'aménagement du territoire (Thèse de V. Russeil);
- Quels impacts et stratégies pour une décarbonation du secteur du transport (Thèse de Mahéva Payet);
- De la question de la ruralité où comment l'identité d'un territoire peut-elle être un vecteur d'un développement soutenable de ce dernier? (Thèse d'Anne-Lise Grondin);
- De la durabilité des espaces bâtis en milieu tropical, où comment optimiser les maillons d'une économie circulaire du déchet du BTP?
- L'approche prospective de la transition énergétique dans les îles africaines : quels outils, méthodes et leçons en retirer pour une application plus large des scénarios éner-

1. Plan Régional des Énergies Renouvelables et d'Utilisation Rationnelle de l'Énergie – (2000)

gétiques à d'autres typologies de territoire ?

Voici donc en quelques lignes les grands axes de ce défi au combien passionnant de la transition écologique que je porterai dans les années à venir. Finalement, dans nos travaux de recherche à venir, comme dans notre quotidien, ces futurs deviennent plausibles si nous nous refusons à tout scepticisme paralysant.

Comme le disait le Sénateur Paul Vergès : « *Ce qui fait l'importance de notre siècle, c'est que, sans sous-estimer tous les obstacles qui nous attendent, le but est devant nous* ».

Bibliographie

- [Achão 2009] Carla Achão et Roberto Schaeffer. *Decomposition analysis of the variations in residential electricity consumption in Brazil for the 1980-2007 period : Measuring the activity, intensity and structure effects*. Energy Policy, vol. 37, no. 12, pages 5208–5220, 2009. (Cité en page 134.)
- [Al-Watwan 2020] Al-Watwan, 2020. (Cité en page 89.)
- [Almeshqab 2019] Fatema Almeshqab et Taha Selim Ustun. *Lessons learned from rural electrification initiatives in developing countries : Insights for technical, social, financial and public policy aspects*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 102, pages 35–53, Mars 2019. (Cité en page 83.)
- [Almorox 2015] Javier Almorox, Victor H Quej et Pau Martí. *Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes*. Journal of Hydrology, vol. 528, pages 514–522, 2015. (Cité en page 106.)
- [Alrashed 2015] Farajallah Alrashed et Muhammad Asif. *Climatic classifications of Saudi Arabia for building energy modelling*. Energy Procedia, vol. 75, pages 1425–1430, 2015. (Cité en page 106.)
- [Anand 1994] Sudhir Anand, Amartya Sen et al. *Human development Index : Methodology and Measurement*. Rapport technique, Human Development Report Office (HDRO), United Nations Development Programme ..., 1994. (Cité en page 109.)
- [Ang 1998] B.W Ang, F.Q Zhang et Ki-Hong Choi. *Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition*. Energy, vol. 23, no. 6, pages 489–495, 1998. (Cité en page 134.)
- [Ang 2001] B. W. Ang et F. L. Liu. *A new energy decomposition method : Perfect in decomposition and consistent in aggregation*. Energy, vol. 26, no. 6, pages 537–548, 2001. (Cité en page 134.)
- [Ang 2004] B. W. Ang. *Decomposition analysis for policymaking in energy : Which is the preferred method?* Energy Policy, vol. 32, no. 9, pages 1131–1139, 2004. (Cité en page 134.)
- [Ang 2005] B W Ang. *The LMDI approach to decomposition analysis : a practical guide*. Energy Policy, vol. 33, pages 867–871, 2005. (Cité en page 136.)
- [Ang 2007] B. W. Ang et Na Liu. *Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach*. Energy Policy, vol. 35, no. 1, pages 238–246, 2007. (Cité en page 134.)
- [Ang 2015] B. W. Ang. *LMDI decomposition approach : A guide for implementation*. Energy Policy, vol. 86, pages 233–238, 2015. (Cité en page 136.)
- [Angeon 2015] Valérie Angeon et Jean-François Hoarau. *Les petites économies insulaires : un monde à part entière ?* Région et Développement, vol. 42, pages 6–13, 2015. (Cité en page 78.)

- [Anselin 1995] Luc Anselin. *Local indicators of spatial association—LISA*. Geographical analysis, vol. 27, no. 2, pages 93–115, 1995. (Cité en page 119.)
- [Assilzadeh 2005] F Assilzadeh, Soteris A Kalogirou, Y Ali et K Sopian. *Simulation and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors*. Renewable energy, vol. 30, no. 8, pages 1143–1159, 2005. (Cité en page 66.)
- [Atkinson 1997] Giles Atkinson, Richard Dubourg, Kirk Hamilton et Mohan Munasinghe. *Measuring sustainable development : macroeconomics and the environment*, 1997. (Cité en page 109.)
- [Attia 2019] Shady Attia, Théo Lacombe, Hery Tiana Rakotondramiarana, François Garde et GholamReza Roshan. *Analysis tool for bioclimatic design strategies in hot humid climates*. Sustainable cities and society, vol. 45, pages 8–24, 2019. (Cité en page 108.)
- [Attiga 1979] Ali Ahmed Attiga. *Global energy transition and the Third World*. Third World Quarterly, vol. 1, no. 4, pages 39–56, 1979. (Cité en page 76.)
- [B.A.D 2017] B.A.D. African statistical yearbook 2017 (french edition). United Nations, 2017. (Cité en page 87.)
- [Balaras 2007] Constantinos A. Balaras, Gershon Grossman, Hans-Martin Henning, Carlos A. Infante Ferreira, Erich Podesser, Lei Wang et Edo Wiemken. *Solar air conditioning in Europe—an overview*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 11, no. 2, pages 299–314, Février 2007. (Cité en pages xiii et 61.)
- [Baležentis 2011] Alvydas Baležentis, Tomas Baležentis et Dalia Streimikiene. *The energy intensity in Lithuania during 1995-2009 : A LMDI approach*. Energy Policy, vol. 39, no. 11, pages 7322–7334, 2011. (Cité en page 134.)
- [Balghouthi 2008] M Balghouthi, MH Chahbani et A Guizani. *Feasibility of solar absorption air conditioning in Tunisia*. Building and environment, vol. 43, no. 9, pages 1459–1470, 2008. (Cité en page 66.)
- [Bank 2017] World Bank. *Comoros Poverty Assessment*. Rapport technique, World Bank, Washington, 2017. (Cité en page 87.)
- [Bank 2019a] World Bank. *Global Wind Atlas 2.0*, feb 2019. (Cité en page 89.)
- [Bank 2019b] World Bank. *Access to electricity (% of population) | Data*, Accessed 18 Jan. 2019. (Cité en pages xiii et 83.)
- [Bank 2019c] World Bank. *Doing Business ranking*, Accessed 18 Jan. 2019. (Cité en page 83.)
- [Bank 2019d] World Bank. *GDP growth (annual %) | Data*, Accessed 18 Jan. 2019. (Cité en pages xiii et 83.)
- [Bardi 2013] Ugo Bardi. *The grand challenge of the energy transition*. Frontiers in Energy Research, vol. 1, page 2, 2013. (Cité en page 75.)
- [Baronnet 1983] F. Baronnet, J.C. Gatina, P. Hervé, J. Leveau et J. Mézino. *Evaluation du potentiel solaire dans la Réunion : Transferts thermiques, habitat bioclimatique, étude du système de chauffe-eau solaire*. Rapport technique, Laboratoire d'énergétique solaire - Université de la Réunion, 1983. (Cité en page 56.)

- [Bartier 1996] Patrick M Bartier et C Peter Keller. *Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW)*. Computers & Geosciences, vol. 22, no. 7, pages 795–799, 1996. (Cité en page 99.)
- [Bastide 2001] Alain Bastide, Harry Boyer, Philippe Lauret, Franck Lucas et François Garde. *Intégration à TRNSYS du noyau de CODYRUN, code de simulation thermo-aéraulique de bâtiments : le Type 59*. In 4ième séminaire TRNSYS-EES, 2001. (Cité en page 68.)
- [Beguerie 2009] Victor Beguerie et Kevin Blanchard. *The potential for renewable energies in rural areas of Madagascar*. Organisations des Nations Unies pour le Développement Industriel, 2009. (Cité en pages 85 et 86.)
- [Bellman 1961] Richard Bellman. *Adaptive control processes : a guided tour princeton university press*. Princeton, New Jersey, USA, 1961. (Cité en page 96.)
- [Bénard-Sora 2016] Fiona Bénard-Sora et Jean Philippe Praene. *Territorial analysis of energy consumption of a small remote island : Proposal for classification and highlighting consumption profiles*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 59, pages 636–648, Juin 2016. (Cité en pages 57, 87 et 171.)
- [Bénard-Sora 2018] Fiona Bénard-Sora et Jean Philippe Praene. *Sustainable urban planning for a successful energy transition on Reunion Island : From policy intentions to practical achievement*. Utilities Policy, vol. 55, pages 1–13, D?embre 2018. (Cité en pages 77 et 82.)
- [Bermejo 2010] Pablo Bermejo, Francisco Javier Pino et Felipe Rosa. *Solar absorption cooling plant in Seville*. Solar Energy, vol. 84, no. 8, pages 1503–1512, 2010. (Cité en page 66.)
- [Bojic 2013] Milorad Bojic, Alexandre Patou Parvedy et Harry Boyer. *Optimization of thermal comfort in building through envelope design*. arXiv preprint arXiv :1302.5941, 2013. (Cité en page 60.)
- [Bonard 2010] Yves Bonard et Laurent Matthey. *Les éco-quartiers : laboratoires de la ville durable*. Cybergeo : European Journal of Geography, vol. 9, 2010. (Cité en page 119.)
- [Bossier 2012] P Bossier. *Interpolation spatiale*. Ouvrage Ecole Nationale des Sciences Géographiques. 53p, 2012. (Cité en page 98.)
- [Bourg 2015] Dominique Bourg et Alain Papaux. *Dictionnaire de la pensée écologique*. Presses Universitaires de France, 2015. (Cité en page 76.)
- [Boutaud 2009] Benoît Boutaud. *Quartier durable ou éco-quartier?* Cybergéo : European journal of geography, 2009. (Cité en page 119.)
- [Boyer 1999a] Harry Boyer. *Thermique et aéraulique des bâtiments : une contribution spécifique, sa validation et ses applications*. PhD thesis, Université de la Réunion, 1999. (Cité en page 67.)
- [Boyer 1999b] Harry Boyer. *Thermique et aéraulique des bâtiments : une contribution spécifique, sa validation et ses applications*. Habilitation à diriger des recherches, Université de la Réunion, 1999. (Cité en page 56.)
- [Briguglio 1995] Lino Briguglio. *Small island developing states and their economic vulnerabilities*. World development, vol. 23, no. 9, pages 1615–1632, 1995. (Cité en pages 55 et 78.)

- [Brundtland 1987] G Brundtland et M Khalid. *UN Brundtland commission report. Our Common Future*, 1987. (Cité en page 76.)
- [Bundhoo 2018] Zumar M.A. Bundhoo. *Renewable energy exploitation in the small island developing state of Mauritius : Current practice and future potential*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pages 2029–2038, Février 2018. (Cité en page 90.)
- [Burton 2013] Elizabeth Burton, Mike Jenks et Katie Williams. *Achieving sustainable urban form*. Routledge, 2013. (Cité en page 120.)
- [Casals 2006] Xavier Garcia Casals. *Solar absorption cooling in Spain : Perspectives and outcomes from the simulation of recent installations*. *Renewable energy*, vol. 31, no. 9, pages 1371–1389, 2006. (Cité en page 66.)
- [Castaing-Lasvignottes 2001] J Castaing-Lasvignottes. *Aspects thermodynamiques et technico-économiques des systèmes à absorption liquide*. Institut français du froid industriel, 2001. (Cité en page 61.)
- [C.E.A 2017] C.E.A. *Profil 2017 - Les Comores*. Rapport technique, Nation Unies, 2017. (Cité en page 87.)
- [CERBTP 2019] CERBTP. *Observatoire des déchets et matériaux recyclés du BTP - Rapport final*. Rapport technique, Cellule économique du bâtiment et des travaux publics de la Réunion, 2019. (Cité en page 175.)
- [Chabot 2015] Pascal Chabot. *L'âge des transitions*. Presses Universitaires de France, 2015. (Cité en page 76.)
- [Chavance 1990] Bernard Chavance. *Quelle transition vers quelle économie de marché pour les pays de l'Est?* *Revue française d'économie*, vol. 5, no. 4, pages 83–104, 1990. (Cité en page 76.)
- [Chen 2020a] Siyuan Chen, Pei Liu et Zheng Li. *Low carbon transition pathway of power sector with high penetration of renewable energy*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 130, page 109985, Septembre 2020. (Cité en page 75.)
- [Chen 2020b] Yufang Chen et Boqiang Lin. *Decomposition analysis of patenting in renewable energy technologies : From an extended LMDI approach perspective based on three Five-Year Plan periods in China*. *Journal of Cleaner Production*, page 122402, Mai 2020. (Cité en page 134.)
- [Cho 2011] Sung Heui Cho et Tae Kyung Lee. *A study on building sustainable communities in high-rise and high-density apartments—Focused on living program*. *Building and environment*, vol. 46, no. 7, pages 1428–1435, 2011. (Cité en page 124.)
- [C.J Nwodo 2019] M.N Anumba C.J Nwodo. *A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach*. *Building and Environment*, vol. 162, 2019. (Cité en page 166.)
- [Comores 2017] Ministère Comores. *Rapport des Assises Nationales de l'Energie en Union des Comores*. Rapport technique, Comoros, 2017. (Cité en page 91.)
- [Connolly 2010] D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen et M. Leahy. *A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems*. *Applied Energy*, vol. 87, no. 4, pages 1059–1082, Avril 2010. (Cité en page 143.)

- [Cukier 1973] RI Cukier, CM Fortuin, Kurt E Shuler, AG Petschek et JH 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, pages 3873–3878, 1973. (Cité en page 65.)
- [Curran 2008] M.A. Curran. *Development of life cycle assessment methodology : a focus on co-product allocation*. PhD thesis, Department of Public Administration ; Erasmus School of Social and Behavioural Sciences, 2008. (Cité en page 157.)
- [D Mitlin 1994] D. Satterthwaite D Mitlin. *Les villes et le développement durable*. In Global Forum, 1994. (Cité en page 116.)
- [David 2018] Mathieu David, Mazorra Aguiar Luis et Philippe Lauret. *Comparison of intra-day probabilistic forecasting of solar irradiance using only endogenous data*. International Journal of Forecasting, vol. 34, no. 3, pages 529–547, 2018. (Cité en page 57.)
- [de France 2020] Ambassade de France. *Visite du chantier de la future centrale solaire de Foubouni, le 23 novembre.*, 2020. (Cité en page 89.)
- [De Jouvenel 1999] Hugues De Jouvenel. *La démarche prospective. Un bref guide méthodologique*. FUTURIBLES-PARIS-, pages 47–68, 1999. (Cité en page 132.)
- [de Oliveira Júnior 2019] Arilson José de Oliveira Júnior, Silvia Regina Lucas de Souza, Enzo Dal Pai, Bruno Timóteo Rodrigues et Valter Cesar de Souza. *Aurora : Mobile application for analysis of spatial variability of thermal comfort indexes of animals and people, using IDW interpolation*. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 157, pages 98–101, 2019. (Cité en page 99.)
- [DEAL 2016] DEAL. *Le livre blanc ville durable réunionnaise*. Rapport technique, DEAL, 2016. (Cité en page 117.)
- [Dind 2007] J-P Dind, M Thomann et Y Bonard. *Structures de la ville, quartiers durables et projet urbain : quelles articulations ?* Urbia, vol. 4, pages 49–75, 2007. (Cité en page 116.)
- [Dóci 2015] Gabriella Dóci, Eleftheria Vasileiadou et Arthur C. Petersen. *Exploring the transition potential of renewable energy communities*. Futures, vol. 66, pages 85–95, Frier 2015. (Cité en page 76.)
- [Drouin 2010] Ariane Drouin et Diane Saint-Laurent. *Comparaison des méthodes d'interpolation pour l'é laboration de modèles numériques d'é lé vation de haute pré cision dans la repré sentation micro-topographique des plaines inondables*. Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques, vol. 55, no. 4, pages 526–539, 2010. (Cité en page 98.)
- [Duffie 1974] John A Duffie et William A Beckman. *Solar energy thermal processes*. Rapport technique, University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, Madison, WI, 1974. (Cité en page 63.)
- [Duval 2018] Guillaume Duval et Madeleine Charru. *Comment accélérer la transition énergétique ? Avis sur la mise en oeuvre de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV)*, 2018. (Cité en page 77.)
- [E. Malia and G. Lewis 2013] E. Malia and G. Lewis. *Life cycle greenhouse gas emissions of electricity generation in the province of Ontario, Canada*. The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 18, pages 377–391, 2013. (Cité en page 166.)

- [Emelianoff 2002] Cyria Emelianoff. *Comment définir une ville durable*. Villes et développement durable. Des expériences à échanger, vol. 3, pages 13–15, 2002. (Cité en page 116.)
- [Emelianoff 2007] Cyria Emelianoff. *La ville durable : l'hypothèse d'un tournant urbanistique en Europe*. L'Information géographique, vol. 71, no. 3, page 48, 2007. (Cité en page 116.)
- [EN 2001] NF EN. 12975-2. *Thermal solar systems and components—solar collectors—Part 2 : test methods*, 2001. (Cité en page 62.)
- [Etienne 2017] Eve Etienne, Divya Leducq, Jean-Philippe Praene, Jean-Claude Gatina et Fiona Sora. *Vers une approche multidimensionnelle de la durabilité : évaluation d'un projet d'aménagement durable*. In SAGEO, 2017. (Cité en pages xiv et 127.)
- [EU 1990] EU. Green paper on the urban environment, volume 12902. Office for Official Publications of the European Communities, 1990. (Cité en page 112.)
- [Faivre 2013] R. Faivre, B. Iooss, S. Mahévas, D. Makowski et H. Monod. Analyse de sensibilité et exploration de modèles : Application aux sciences de la nature et de l'environnement. Collection Savoir-faire. Éd. Quae, 2013. (Cité en page 137.)
- [Félonneau 2007] Marie-Line Félonneau et André Lecigne. *Désirabilité de l'environnement et représentations sociales de la ville idéale*. Bulletin de psychologie, no. 6, pages 567–579, 2007. (Cité en page 122.)
- [Florides 2002] Georgios A Florides, Soteris A Kalogirou, Savvas A Tassou et LC Wrobel. *Modelling, simulation and warming impact assessment of a domestic-size absorption solar cooling system*. Applied thermal engineering, vol. 22, no. 12, pages 1313–1325, 2002. (Cité en page 66.)
- [Fouquet 2011] Roger Fouquet. *Divergences in long-run trends in the prices of energy and energy services*. Review of Environmental Economics and Policy, vol. 5, no. 2, pages 196–218, 2011. (Cité en page 76.)
- [Fraley 1998] Chris Fraley et Adrian E Raftery. *How many clusters ? Which clustering method ? Answers via model-based cluster analysis*. The computer journal, vol. 41, no. 8, pages 578–588, 1998. (Cité en page 97.)
- [française 2020] République française. *LOI 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire*, 2020. (Cité en page 176.)
- [GA 2015] UN GA. *Transforming our world : the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Division for Sustainable Development Goals : New York, NY, USA, 2015. (Cité en page 76.)
- [Garabedian 2011] Sabine Garabedian et Jean-François Hoarau. *Un indicateur de développement humain soutenable pour les petits espaces insulaires en développement*. Revue d'Economie Regionale Urbaine, no. 4, pages 651–680, 2011. (Cité en page 55.)
- [Garde 1998] F. Garde, H. Boyer et J.C. Gatina. *Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in French tropical island buildings*. Building and Environment, vol. 34, no. 1, pages 71–83, Janvier 1998. (Cité en page 60.)

- [Garde 2006] François Garde, Alain Bastide, Dalila Bentaleb et Eric Ottenwelter. *The Construction of a Zero Energy Building in Reunion Island : Presentations of a New Approach to the Design Studies*. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, volume 47640, pages 199–207, 2006. (Cité en page 58.)
- [Garde 2011] François Garde, Mathieu David, Aurélie Lenoir et Eric Ottenwelter. *Towards Net Zero Energy Buildings in Hot Climates : Part 1, New Tools and Methods*. ASHRAE transactions, vol. 117, no. 1, 2011. (Cité en page 58.)
- [Gardumi 2018] Francesco Gardumi, Abhishek Shivakumar, Robbie Morrison, Constantinos Taliotis, Oliver Broad, Agnese Beltramo, Vignesh Sridharan, Mark Howells, Jonas Hörsch, Taco Nietet *al*. *From the development of an open-source energy modelling tool to its application and the creation of communities of practice : The example of OSeMO-SYS*. Energy strategy reviews, vol. 20, pages 209–228, 2018. (Cité en page 143.)
- [Gauvin 2000] Gilles Gauvin. *Le parti communiste de La Réunion (1946-2000)*. Vingtième siècle. Revue d'histoire, pages 73–94, 2000. (Cité en page 80.)
- [Genave 2020] Anna Genave, Stéphane Blancard et Sabine Garabedian. *An assessment of energy vulnerability in Small Island Developing States*. Ecological Economics, vol. 171, page 106595, Mai 2020. (Cité en page 78.)
- [Getis 1991] Arthur Getis. *Spatial interaction and spatial autocorrelation : a cross-product approach*. Environment and Planning A, vol. 23, no. 9, pages 1269–1277, 1991. (Cité en page 119.)
- [Getis 2010] Arthur Getis et J Keith Ord. *The analysis of spatial association by use of distance statistics*. In Perspectives on spatial data analysis, pages 127–145. Springer, 2010. (Cité en page 119.)
- [Ghaddar 1997] NK Ghaddar, M Shihab et F Bdeir. *Modeling and simulation of solar absorption system performance in Beirut*. Renewable energy, vol. 10, no. 4, pages 539–558, 1997. (Cité en page 66.)
- [Gnansounou 2008] Edgard Gnansounou. *Assessing the energy vulnerability : Case of industrialised countries*. Energy Policy, vol. 36, no. 10, pages 3734–3744, 2008. (Cité en page 110.)
- [Guan 2018] Dabo Guan, Jing Meng, David M. Reiner, Ning Zhang, Yuli Shan, Zhifu Mi, Shuai Shao, Zhu Liu, Qiang Zhang et Steven J. Davis. *Structural decline in China's CO2 emissions through transitions in industry and energy systems*. Nature Geoscience, vol. 11, no. 8, pages 551–555, jul 2018. (Cité en page 134.)
- [Guinee 2011] Jeroen B Guinee, Reinout Heijungs, Gjalt Huppes, Alessandra Zamagni, Paolo Masoni, Roberto Buonamici, Tomas Ekvall et Tomas Rydberg. *Life cycle assessment : past, present, and future*, 2011. (Cité en page 157.)
- [Gupta 2008] Eshita Gupta. *Oil vulnerability index of oil-importing countries*. Energy policy, vol. 36, no. 3, pages 1195–1211, 2008. (Cité en page 110.)
- [Hamman 2017] Philippe Hamman, Virginie Anquetin et Céline Monicolle. *Du « développement durable » à la « ville durable » : quels débats aujourd'hui ? Regards croisés à partir*

- de la littérature francophone et anglophone*. VertigO, no. Volume 17 Numéro 1, Mai 2017. (Cité en page 115.)
- [Han 2012] Jiawei Han, Micheline Kamber et Jian Pei. *Data mining : concepts and techniques*, Waltham, MA. Morgan Kaufman Publishers, vol. 10, pages 978–1, 2012. (Cité en page 169.)
- [Hansen 2019] Paula Hansen, Xin Liu et Gregory M. Morrison. *Agent-based modelling and socio-technical energy transitions : A systematic literature review*. Energy Research & Social Science, vol. 49, pages 41–52, Mars 2019. (Cité en page 72.)
- [Hcéres 2019] Hcéres. *Résumé final de l'évaluation de l'unité : Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'Environnement et le Bâtiment (PIMENT)*. Rapport d'évaluation d'une entité de recherche, Hcéres, 2019. (Cité en page 57.)
- [Henning 2007a] Hans-Martin Henning. *Solar assisted air conditioning of buildings—an overview*. Applied thermal engineering, vol. 27, no. 10, pages 1734–1749, 2007. (Cité en page 59.)
- [Henning 2007b] H.M. Henning. *Solar-assisted air-conditioning in buildings : A handbook for planners*. Springer Vienna, 2007. (Cité en page 60.)
- [Herbert 2016] Anne-Sophie Herbert, Catherine Azzaro-Pantel et Denis Le Boulch. *A typology for world electricity mix : Application for inventories in Consequential LCA (CLCA)*. Sustainable Production and Consumption, vol. 8, pages 93–107, Octobre 2016. (Cité en page 100.)
- [Holma 2013] Anne Holma, Kati Koponen, Riina Antikainen, Laurent Lardon, Pekka Leskinen et Philippe Roux. *Current limits of life cycle assessment framework in evaluating environmental sustainability – case of two evolving biofuel technologies*. Journal of Cleaner Production, vol. 54, pages 215–228, Septembre 2013. (Cité en page 158.)
- [Hossain 2017] Md. Faruque Hossain. *Green science : Independent building technology to mitigate energy, environment, and climate change*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 73, pages 695–705, Juin 2017. (Cité en page 72.)
- [Hotelling 1933] Harold Hotelling. *Analysis of a complex of statistical variables into principal components*. Journal of educational psychology, vol. 24, no. 6, page 417, 1933. (Cité en page 96.)
- [Hou 2017] Deyi Hou, David O'Connor, Paul Nathanail, Li Tian et Yan Ma. *Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination : A critical review*. Environmental Pollution, vol. 231, pages 1188–1200, 2017. (Cité en page 99.)
- [Howells 2011] Mark Howells, Holger Rogner, Neil Strachan, Charles Heaps, Hillard Huntington, Socrates Kypreos, Alison Hughes, Semida Silveira, Joe DeCarolis, Morgan Bazillian et al. *OSeMOSYS : the open source energy modeling system : an introduction to its ethos, structure and development*. Energy Policy, vol. 39, no. 10, pages 5850–5870, 2011. (Cité en page 143.)
- [Husson 2017] François Husson, Sébastien Lê et Jérôme Pagès. *Exploratory multivariate analysis by example using r*. CRC press, 2017. (Cité en page 98.)

- [IEA 2008] IEA. *World Energy Outlook 2008*. Rapport technique, Agence Internationale de l'Énergie, 2008. (Cité en page 59.)
- [IEA 2018] IEA. *The Future of Cooling*. Rapport technique, Agence Internationale de l'Énergie, 2018. (Cité en page 58.)
- [INSEE 2017] INSEE. *Projections de population 2013-2050 pour les départements et les régions*, juin 2017. (Cité en page 78.)
- [IPCC 2007] IPCC. *Climate change 2007 : The physical science basis : Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change : Summary for policymakers and technical summary and frequently asked questions*. Cambridge University Press, 2007. (Cité en page 71.)
- [IPCC 2014] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE IPCC. *Climate Change 2014 : synthesis report*. Geneva : IPCC, 2014. (Cité en page 71.)
- [IPCC 2018] IPCC. *Global Warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5° C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, 2018. (Cité en pages xiii et 72.)
- [IRENA 2020] IRENA. *Renewable power generation costs in 2019. Report*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020. (Cité en page 86.)
- [ISO-Norm 2006] ISO ISO-Norm. *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework ISO 14040 : 2006*. ISO : Geneva, Switzerland, 2006. (Cité en page 157.)
- [Jain 1999] Anil K Jain, M Narasimha Murty et Patrick J Flynn. *Data clustering : a review*. ACM computing surveys (CSUR), vol. 31, no. 3, pages 264–323, 1999. (Cité en page 97.)
- [Jauze 1998] Jean-Michel Jauze. *Les centralités emboîtées de l'espace réunionnais*. Mappemonde, vol. 51, no. 3, pages 27–30, 1998. (Cité en page 117.)
- [Jauze 2005] Jean-Michel Jauze. *L'urbanisation de l'Île de la Réunion : évolution et modèles de villes*. Cahiers de géographie du Québec, vol. 42, no. 116, pages 195–221, Avril 2005. (Cité en page 117.)
- [Jebaraj 2006] S. Jebaraj et S. Iniyan. *A review of energy models*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 10, no. 4, pages 281–311, Août 2006. (Cité en page 142.)
- [Jégou 2012] Anne Jégou, Cédissia About de Chastenet, Vincent Augiseau, Cécile Guyot, Cécile Judéaux, François-Xavier Monaco et Pierre Pech. *L'évaluation par indicateurs : un outil nécessaire d'aménagement urbain durable ?* Cybergeographie, D'embre 2012. (Cité en page 119.)
- [Jevons 1866] William Stanley Jevons. *The Coal Question ; An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-Mines*. Fortnightly, vol. 6, no. 34, pages 505–507, 1866. (Cité en page 75.)
- [Jolliet 2010] Olivier Jolliet, Myriam Saadé et Pierre Crettaz. *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, volume 23. PPUR Presses polytechniques, 2010. (Cité en page 157.)

- [JRC 2012] EC JRC. *Life cycle indicators for resources, products and waste*. Report EUR, vol. 25520, 2012. (Cité en page 159.)
- [Julien 1975] Pierre-Andre Julien, Pierre Lamonde et Daniel Latouche. *La méthode des scénarios en prospective*. L'Actualité économique, vol. 51, no. 2, pages 253–281, 1975. (Cité en pages xiv et 132.)
- [Kaiser 1960] Henry F Kaiser. *The application of electronic computers to factor analysis*. Educational and psychological measurement, vol. 20, no. 1, pages 141–151, 1960. (Cité en pages 97 et 169.)
- [Kammainga 1985] W Kammainga. *Experiences of a solar collector test method using Fourier transfer functions*. International journal of heat and mass transfer, vol. 28, no. 7, pages 1393–1404, 1985. (Cité en page 63.)
- [Kang 2020] Jia-Ning Kang, Yi-Ming Wei, Lan-Cui Liu, Rong Han, Bi-Ying Yu et Jin-Wei Wang. *Energy systems for climate change mitigation : A systematic review*. Applied Energy, vol. 263, page 114602, Avril 2020. (Cité en page 72.)
- [Kim 2017] Suyi Kim. *LMDI Decomposition Analysis of Energy Consumption in the Korean Manufacturing Sector*. Sustainability, vol. 9, no. 2, page 202, 2017. (Cité en page 134.)
- [Klöpffer 2014] Walter Klöpffer et Birgit Grahl. *Life cycle assessment (lca) : a guide to best practice*. John Wiley & Sons, 2014. (Cité en page 157.)
- [Kravchenko 1999] Alexandra Kravchenko et Donald G Bullock. *A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties*. Agronomy Journal, vol. 91, no. 3, pages 393–400, 1999. (Cité en page 99.)
- [Kuang 2016] Yonghong Kuang, Yongjun Zhang, Bin Zhou, Canbing Li, Yijia Cao, Lijuan Li et Long Zeng. *A review of renewable energy utilization in islands*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 59, pages 504–513, Juin 2016. (Cité en page 78.)
- [Kutcher 1983] G Kutcher et Pasquale L Scandizzo. *The energy transition in developing countries*. The World Bank, 1983. (Cité en page 76.)
- [Labache 2017] Lucette Labache. *En attendant l'indépendance?* Cahiers d'études africaines, no. 226, pages 355–378, Juillet 2017. (Cité en page 80.)
- [Laukkonen 2009] Julia Laukkonen, Paola Kim Blanco, Jennifer Lenhart, Marco Keiner, Branko Cavric et Cecilia Kinuthia-Njenga. *Combining climate change adaptation and mitigation measures at the local level*. Habitat International, vol. 33, no. 3, pages 287–292, Juillet 2009. (Cité en page 71.)
- [Lawson 1990] Richard G Lawson et Peter C Jurs. *New index for clustering tendency and its application to chemical problems*. Journal of chemical information and computer sciences, vol. 30, no. 1, pages 36–41, 1990. (Cité en page 169.)
- [Levet 2019] Jérôme Levet et Théo Grondin. *Retour d'expérience sur un projet d'hydroélectricité en milieu rural à Madagascar*. Rapport technique, GRET, 2019. (Cité en page 83.)
- [Li 2014] Jin Li et Andrew D Heap. *Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences : A review*. Environmental Modelling & Software, vol. 53, pages 173–189, 2014. (Cité en page 99.)

- [Lima 2016] Fátima Lima, Manuel Lopes Nunes, Jorge Cunha et André F.P. Lucena. *A cross-country assessment of energy-related CO2 emissions : An extended Kaya Index Decomposition Approach*. Energy, vol. 115, pages 1361–1374, 2016. (Cité en page 162.)
- [Lockie 2013] Stewart Lockie, David A Sonnenfeld et Dana R Fisher. *Routledge international handbook of social and environmental change*. Routledge, 2013. (Cité en page 115.)
- [Lomas 1992] Kevin J. Lomas et Herbert Eppel. *Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs*. Energy and Buildings, vol. 19, no. 1, pages 21 – 44, 1992. (Cité en page 137.)
- [Ma 2018] Minda Ma, Wei Cai et Weiguang Cai. *Carbon abatement in China’s commercial building sector : A bottom-up measurement model based on Kaya-LMDI methods*. Energy, vol. 165, pages 350–368, 2018. (Cité en page 163.)
- [Mahmoud 2011] Ayman Hassaan A Mahmoud. *An analysis of bioclimatic zones and implications for design of outdoor built environments in Egypt*. Building and Environment, vol. 46, no. 3, pages 605–620, 2011. (Cité en page 106.)
- [Mahony 2013] Tadhg O Mahony. *Decomposition of Ireland’s carbon emissions from 1990 to 2010 : An extended Kaya identity*. Energy Policy, vol. 59, pages 573–581, 2013. (Cité en page 162.)
- [Maïzi 2012] Nadia Maïzi. *De la dimension infinie à la dimension prospective : variations autour du paradigme d’optimalité*. PhD thesis, Mines Paris Tech., 2012. (Cité en page 131.)
- [Malan 2013] N Malan, CJC Reason et BR Loveday. *Variability in tropical cyclone heat potential over the Southwest Indian Ocean*. Journal of Geophysical Research : Oceans, vol. 118, no. 12, pages 6734–6746, 2013. (Cité en page 117.)
- [Mamode 2017] Malik Mamode. *Computation of the Madelung constant for hypercubic crystal structures in any dimension*. Journal of Mathematical Chemistry, vol. 55, no. 3, pages 734–751, 2017. (Cité en page 57.)
- [Mancebo 2011] François Mancebo. *La ville durable est-elle soluble dans le changement climatique ?* Environnement urbain/Urban environment, vol. 5, pages 1–9, 2011. (Cité en page 116.)
- [Manzo 2006] Lynne C Manzo et Douglas D Perkins. *Finding common ground : The importance of place attachment to community participation and planning*. Journal of planning literature, vol. 20, no. 4, pages 335–350, 2006. (Cité en page 122.)
- [Mara 2000] Thierry A Mara. *CONTRIBUTION A LA VALIDATION GLOBALE D’UN LOGICIEL DE SIMULATION THERMO-AERAULIQUE DU BATIMENT : PROPOSITION DE NOUVEAUX OUTILS D’AIDE A LA VALIDATION*. PhD thesis, Université de la Réunion, 2000. (Cité en page 65.)
- [Mara 2008] Thierry A Mara et Stefano Tarantola. *Application of global sensitivity analysis of model output to building thermal simulations*. In Building Simulation, volume 1, pages 290–302. Springer, 2008. (Cité en page 65.)
- [Mara 2009] Thierry Alex Mara. *Extension of the RBD-FAST method to the computation of global sensitivity indices*. Reliability Engineering & System Safety, vol. 94, no. 8, pages 1274–1281, 2009. (Cité en page 65.)

- [Mara 2017] Thierry A Mara, Noura Fajraoui, Alberto Guadagnini et Anis Younes. *Dimensionality reduction for efficient Bayesian estimation of groundwater flow in strongly heterogeneous aquifers*. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, vol. 31, no. 9, pages 2313–2326, 2017. (Cité en page 57.)
- [Marangoni 2017] G. Marangoni, M. Tavoni, V. Bosetti, E. Borgonovo, P. Capros, O. Fricko, D. E. H. J. Gernaat, C. Guivarch, P. Havlik, D. Huppmann, N. Johnson, P. Karkatsoulis, I. Keppo, V. Krey, E. Ó Broin, J. Price et D. P. van Vuuren. *Sensitivity of projected long-term CO2 emissions across the Shared Socioeconomic Pathways*. Nature Climate Change, vol. 7, no. 2, pages 113–117, jan 2017. (Cité en page 134.)
- [Marc 2010] Olivier Marc. *Etude expérimentale, modélisation et optimisation d'un procédé de rafraîchissement solaire à absorption couplé au bâtiment*. PhD thesis, Université de la Réunion, 2010. (Cité en pages 56 et 70.)
- [Marc 2011] Olivier Marc, Jean-Philippe Praene, Alain Bastide et Franck Lucas. *Modeling and experimental validation of the solar loop for absorption solar cooling system using double-glazed collectors*. Applied Thermal Engineering, vol. 31, no. 2-3, pages 268–277, 2011. (Cité en page 69.)
- [Markard 2012] Jochen Markard, Rob Raven et Bernhard Truffer. *Sustainability transitions : An emerging field of research and its prospects*. Research Policy, vol. 41, no. 6, pages 955–967, Juillet 2012. (Cité en page 76.)
- [Massé 1964] Pierre Massé. *Réflexions pour 1985*. La documentation française, 1964. (Cité en page 131.)
- [Mathieu 2016] Nicole Mathieu. *Modes d'habiter. «Modes d'habiter», «cultures de la nature» : des concepts indissociables*. Guide des humanités environnementales. Villeneuve d'Ascq : Presses universitaires du Septentrion, coll. «Environnement et société», 2016. (Cité en page 121.)
- [McCoy 2001] Jill McCoy, Kevin Johnston et al. *Using ArcGIS Spatial Analyst : GIS by ESRI : Environmental Systems Research Institute*. ESRI, 2001. (Cité en page 98.)
- [Meadows 1972] Donella H Meadows, Dennis L Meadows, Jorgen Randers et William W Behrens. *The limits to growth*. New York, vol. 102, no. 1972, page 27, 1972. (Cité en page 76.)
- [Millot 2019a] Ariane Millot. *Faire la transition énergétique bas-carbone ou comment réaliser l'avènement d'un mythe ?* PhD thesis, PSL Research University, 2019. (Cité en page 93.)
- [Millot 2019b] Ariane Millot, Vincent Mazaauric et Nadia Maïzi. *From phase transition to energy transition : What can we learn from physics ?* Energy Procedia, vol. 158, pages 3930–3936, 2019. (Cité en page 76.)
- [Ministère de l'Énergie et des Hydrocarbures 2015] Ministère de l'Énergie et des Hydrocarbures. *Lettre de politique de l'énergie de Madagascar 2015-2030*. Rapport technique, Republic of Madagascar, 2015. (Cité en page 86.)
- [Mohammed 2019] Azad A. Mohammed, Ilham I. Mohammed et Shuaaib A. Mohammed. *Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets*.

- Construction and Building Materials, vol. 201, pages 232–245, Mars 2019. (Cité en page 170.)
- [Mohit 2012] Mohammad Abdul Mohit et Mohamed Azim. *Assessment of residential satisfaction with public housing in Hulhumale', Maldives*. Procedia-Social and Behavioral Sciences, vol. 50, pages 756–770, 2012. (Cité en page 121.)
- [Morales 2019] Michele Morales, Gustavo Moraga, Ana Paula Kirchheim et Ana Passuello. *Regionalized inventory data in LCA of public housing : A comparison between two conventional typologies in southern Brazil*. Journal of Cleaner Production, vol. 238, page 117869, 2019. (Cité en page 158.)
- [Moran 1950] PAP Moran. *Notes on continuous stochastic phenomena*. Biometrika, vol. 37, page 17, 1950. (Cité en page 119.)
- [Morau 2006] D. Morau. *Modélisation des dispositifs de revalorisation énergétique des déchets solides et liquides : séchage, méthanisation, incinération : mise en œuvre d'un outil d'aide à la conception multi-systèmes et multi-modèles*. Thèse, Université de la Réunion, 2006. (Cité en page 56.)
- [Morris 1982] D.J. Morris. *Self-reliant cities. Energy and the transformation of urban America*. Sierra Club Books, 1982. (Cité en page 116.)
- [Morris 1991a] Max D Morris. *Factorial sampling plans for preliminary computational experiments*. Technometrics, vol. 33, no. 2, pages 161–174, 1991. (Cité en page 65.)
- [Morris 1991b] Max D. Morris. *Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments*. Technometrics, vol. 33, no. 2, pages 161–174, 1991. (Cité en page 137.)
- [Moser 2002] Gabriel Moser, Eugénia Ratiu et Ghozlane Fleury-Bahi. *Appropriation and interpersonal relationships : from dwelling to city through the neighborhood*. Environment and behavior, vol. 34, no. 1, pages 122–136, 2002. (Cité en page 120.)
- [Mugnier 2002] Daniel Mugnier. *Rafraîchissement solaire de locaux par sorption : optimisation théorique et pratique*. PhD thesis, Paris, ENMP, 2002. (Cité en pages 60, 67 et 68.)
- [Ng 2003] Edward Ng et Kam-Sing Wong. *Efficiency & livability : Towards sustainable habitation in Hong Kong*. In Hong Kong Housing Authority Conference, volume 2003, 2003. (Cité en page 124.)
- [Nicolescu 1996] Basarab Nicolescu. *La transdisciplinarité*. Manifeste, Editions du Rocher, Monaco, 1996. (Cité en page 95.)
- [Notton 2015] Gilles Notton. *Importance of islands in renewable energy production and storage : The situation of the French islands*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 47, pages 260–269., 2015. (Cité en page 161.)
- [Oduyemi., O, Okoroh., M.I, Fajana. 2017] O.S Oduyemi., O, Okoroh., M.I, Fajana. *The application and barriers of BIM in sustainable building design*. Journal of Facilities Management, vol. 15, pages 15–34, 2017. (Cité en page 166.)
- [Oliveau 2010] Sébastien Oliveau. *Autocorrélation spatiale : leçons du changement d'échelle*. Espace géographique, vol. 39, no. 1, page 51, 2010. (Cité en page 119.)

- [Olmer 2017] Naya Olmer, Bryan Comer, Biswajoy Roy, Xiaoli Mao et Dan Rutherford. *Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013-2015 Detailed methodology*. ICCT (The International Council on Clean Transportation), page 52, 2017. (Cité en page 174.)
- [Pacheco-Torgal 2014] Fernando Pacheco-Torgal, Luisa F Cabeza, João Labrincha et Aldo Giuntini De Magalhaes. *Eco-efficient construction and building materials : life cycle assessment (lca), eco-labelling and case studies*. woodhead Publishing, 2014. (Cité en page 166.)
- [Painuly 2001] Jyoti P Painuly. *Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis*. *Renewable energy*, vol. 24, no. 1, pages 73–89, 2001. (Cité en page 82.)
- [Pavadépoullé 2017] Kelvin Pavadépoullé. *Effets des projets d'aménagement sur le voisinage direct à l'échelle des aires urbaines : Analyse spatiale diachronique en milieu insulaire*. In *Spatial Analysis and GEomatics 2017*, 2017. (Cité en pages xiv et 120.)
- [Pearson 1901] Karl Pearson. *LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space*. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 2, no. 11, pages 559–572, 1901. (Cité en page 96.)
- [Peel 2007] Murray C Peel, Brian L Finlayson et Thomas A McMahon. *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification*. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 2007. (Cité en page 106.)
- [Penny 2020] Ann Penny, Shelley Templeman, Madeline McKenzie, Daniela Tello Toral et Erin Hunt. *State of the tropics*. Rapport technique, James Cook University, 2020. (Cité en page 116.)
- [Polimeni 2015] John M Polimeni, Kozo Mayumi, Mario Giampietro et Blake Alcott. *The myth of resource efficiency : the jevons paradox*. Routledge, 2015. (Cité en page 75.)
- [Praene 2005] Jean Philippe Praene, François Garde et Franck Lucas. *Steady state model of a solar evacuated tube collector based on sensitivity analysis*. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, volume 42185, pages 381–386, 2005. (Cité en page 66.)
- [Praene 2007] J-P. Praene. *Intégration et modélisation dynamique de composants d'un système de rafraîchissement solaire à absorption couplé au bâtiment*. Thèse, Université de la Réunion, 2007. (Cité en page 56.)
- [Praene 2011] Jean Philippe Praene, Olivier Marc, Franck Lucas et Frédéric Miranville. *Simulation and experimental investigation of solar absorption cooling system in Reunion Island*. *Applied Energy*, vol. 88, no. 3, pages 831–839, 2011. (Cité en page 69.)
- [Praene 2012] Jean Philippe Praene, Mathieu David, Frantz Sinama, Dominique Morau et Olivier Marc. *Renewable energy : Progressing towards a net zero energy island, the case of Reunion Island*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pages 426–442, 2012. (Cité en page 82.)
- [Praene 2017a] Jean Philippe Praene, Mamy Harimisa Radanielina, Vanessa Rolande Rakoto-son, Ando Ludovic Andriamamonjy, Frantz Sinama, Dominique Morau et Hery Tiana

- Rakotondramiarana. *Electricity generation from renewables in Madagascar : Opportunities and projections*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 76, pages 1066–1079, 2017. (Cité en pages 57, 85, 87 et 133.)
- [Praene 2017b] Jean-Philippe Praene, Fiona Sora, Leslie Ayagapin, Amandine Junot et Patrice Marcel. *Perception des habitants de la rénovation urbaine de la Ravine Blanche : Evaluation des questions de déplacements et environnementales*. In ESRA, 2017. (Cité en page 127.)
- [Qin 2014] Dahe Qin, GK Plattner, M Tignor, SK Allen, J Boschung, A Nauels, Y Xia, V Bex, PM Midgley et al. *Climate change 2013 : the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds TF Stocker et al.), pages 5–14, 2014. (Cité en page 117.)
- [Raghoo 2018] Pravesh Raghoo, Dinesh Surroop, Franziska Wolf, Walter Leal Filho, Pratima Jeetah et Bernd Delakowitz. *Dimensions of energy security in small island developing states*. Utilities Policy, vol. 53, pages 94–101, 2018. (Cité en page 133.)
- [Raineau 2011] Laurence Raineau. *Dossier «Adaptation aux changements climatiques»-Vers une transition énergétique ?* Natures Sciences Sociétés, vol. 19, no. 2, pages 133–143, 2011. (Cité en page 75.)
- [Rakoto-Joseph 2009] Onimihamina Rakoto-Joseph, François Garde, Mathieu David, Laetitia Adelard et ZA Randriamanantany. *Development of climatic zones and passive solar design in Madagascar*. Energy Conversion and Management, vol. 50, no. 4, pages 1004–1010, 2009. (Cité en page 108.)
- [Rakotoson 2017] Vanessa Rakotoson et Jean Philippe Praene. *A life cycle assessment approach to the electricity generation of French overseas territories*. Journal of Cleaner Production, vol. 168, pages 755–763, 2017. (Cité en pages xiv, 162 et 173.)
- [Rakotoson 2018] Vanessa Rakotoson. *Intégration de l'analyse de cycle de vie dans l'étude de la production électrique en milieux insulaires*. PhD thesis, Université de la Reunion, 2018. (Cité en page 173.)
- [Ramarojaona 2011] P Ramarojaona, E Andriamboavonjy et A Alison. *Madagascar face aux défis du changement climatique*. Rapport technique, Tech. Rep, 2011. (Cité en page 85.)
- [Raymond 2017] Roland Raymond. *Transition énergétique et transdisciplinarité*. Natures Sciences Sociétés, no. Supp. 4, pages 42–44, 2017. (Cité en page 95.)
- [Razafindrakoto 2014] Mireille Razafindrakoto. *Élites, pouvoir et régulation à Madagascar*. Afrique contemporaine, vol. 251, no. 3, page 25, 2014. (Cité en page 82.)
- [Razafindrakoto 2015] Mireille Razafindrakoto, François Roubaud et Jean-Michel Wachsberger. *L'île mystérieuse : une approche d'économie politique de la trajectoire longue de Madagascar*. Canadian Journal of Development Studies/Revue canadienne d'études du développement, vol. 36, no. 3, pages 397–415, 2015. (Cité en page 82.)
- [Renauld 2012] Vincent Renauld. *Fabrication et usage des écoquartiers français : éléments d'analyse à partir des quartiers De Bonne (Grenoble), Ginko (Bordeaux) et Bottière-Chénaie (Nantes)*. PhD thesis, Lyon, INSA, 2012. (Cité en page 121.)

- [Ress 1996] William E Ress et Mathis Wackernagel. *Ecological footprints and appropriated carrying capacity : Measuring the natural capital requirements of the human economy*. Focus, vol. 6, no. 1, pages 45–60, 1996. (Cité en page 116.)
- [Rogers 2008] Richard George Rogers et Philip Gumuchdjian. Des villes durables pour une petite plan te. Moniteur, 2008. (Cité en page 116.)
- [Romano 2016] Antonio A Romano, Giuseppe Scandurra, Alfonso Carfora et Rosaria V Panisini. *Assessing the determinants of SIDS’pattern toward sustainability : A statistical analysis*. Energy Policy, vol. 98, pages 688–699, 2016. (Cité en page 110.)
- [Rosa 2012] Eugene A. Rosa et Thomas Dietz. *Human drivers of national greenhouse-gas emissions*. Nature Climate Change, vol. 2, no. 8, pages 581–586, 2012. (Cité en pages 162 et 163.)
- [Roux 2002] Michel Roux. *Inventer un nouvel art d’habiter*. l’Harmattan, 2002. (Cité en page 121.)
- [Rüdinger 2017] Andreas Rüdinger, Michel Colombier, Nicolas Berghmans, Patrick Criqui et Philippe Menanteau. *La transition du système électrique français à l’horizon 2030 : Une analyse exploratoire des enjeux et des trajectoires*, 2017. (Cité en page 77.)
- [Sachs 2019] Jeffrey Sachs, Guido Schmidt-Traub, Christian Kroll, Guillaume Lafortune et Grayson Fuller. *Sustainable development report 2019*. Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network (SDSN) : New York, NY, USA, vol. 2, 2019. (Cité en page 112.)
- [Saltelli 1999] A. Saltelli, S. Tarantola et K. P.-S. Chan. *A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output*. Technometrics, vol. 41, no. 1, pages 39–56, 1999. (Cité en page 137.)
- [Saltelli 2000] A. Saltelli, S. Tarantola et F. Campolongo. *Sensitivity Analysis as an Ingredient of Modeling*. Statistical Science, vol. 15, no. 4, pages 377–395, 2000. (Cité en page 137.)
- [Sch ggel 2020] Josef-Peter Sch ggel, Lukas Stumpf et Rupert J Baumgartner. *The narrative of sustainability and circular economy-A longitudinal review of two decades of research*. Resources, Conservation and Recycling, vol. 163, page 105073, 2020. (Cité en page 156.)
- [Scott 2016] A Scott et C Miller. *Accelerating access to electricity in Africa with off-grid solar : The market for solar household solutions*. Overseas Development Institute, 2016. (Cité en page 83.)
- [SEL 1975] SEL. Trnsys, a transient simulation program. Madison, Wis. : The Laboratory, 1975., 1975. Loose-leaf for updating. ;March 31, 1975. ;"This manual, and the TRNSYS program it describes, were developed under grants from the RANN program of the National Science Foundation (Grant GI 34029), and from the Energy Research and Development Administration (Contract E(11-1)-2588). (Cité en page 67.)
- [Selosse 2018] Sandrine Selosse, Sabine Garabedian, Olivia Ricci et Nadia Ma zi. *The renewable energy revolution of reunion island*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 89, pages 99–105, 2018. (Cité en page 82.)

- [Semmari 2014] Hamza Semmari, Olivier Marc, Jean-Philippe Praene, Amandine Le Denn, François Boudéhenn et Franck Lucas. *Sensitivity Analysis of the New Sizing Tool “PIS-TACHE” for Solar Heating, Cooling and Domestic Hot Water Systems*. Energy Procedia, vol. 48, pages 997–1006, 2014. (Cité en page 70.)
- [Shepherd 2020] David Alós Shepherd, Engin Kotan et Frank Dehn. *Plastic concrete for cut-off walls : A review*. Construction and Building Materials, vol. 255, page 119248, Septembre 2020. (Cité en page 170.)
- [SIE 2017] SIE. *Bilan énergétique national*. Rapport technique, Ministère de l’Energie et des Hydrocarbures, 2017. (Cité en pages xiii et 84.)
- [Simon 2008] Thierry Simon. *Une île en mutation : Infrastructures, aménagement et développement à La Réunion*. Echo Geo, vol. 7, 2008. (Cité en page 171.)
- [Sinama 2011] Frantz Sinama. *Étude de la production d’électricité à partir de l’énergie thermique des mers à l’île de la Réunion : modélisation et optimisation du procédé*. Thèse, Université de la Réunion, 2011. (Cité en pages 56 et 81.)
- [Sinama 2015] Frantz Sinama, Matthieu Martins, Audrey Journoud, Olivier Marc et Franck Lucas. *Thermodynamic analysis and optimization of a 10 MW OTEC Rankine cycle in Reunion Island with the equivalent Gibbs system method and generic optimization program GenOpt*. Applied Ocean Research, vol. 53, pages 54–66, 2015. (Cité en page 81.)
- [Sinama 2016] Frantz Sinama, Audrey Journoud, Alexandre Dijoux, Franck Lucas, Bertrand Clauzade, Jean Castaing-Lasvignottes et Olivier Marc. *Etude expérimentale d’un prototype ETM à La Réunion*. In SFT, 2016. (Cité en page 81.)
- [Singh 2009] Rajesh Kumar Singh, H Ramalinga Murty, S Kumar Gupta et A Kumar Dikshit. *An overview of sustainability assessment methodologies*. Ecological indicators, vol. 9, no. 2, pages 189–212, 2009. (Cité en page 108.)
- [Smil 2010] Vaclav Smil. *Energy transitions : history, requirements, prospects*. ABC-CLIO, 2010. (Cité en page 76.)
- [Sobol 1993] M. Sobol. *Sensitivity estimates for non-linear mathematical models*. MMCE, vol. 1, no. 4, pages 407–414, 1993. (Cité en page 137.)
- [Sovacool 2011] Benjamin K. Sovacool et Ishani Mukherjee. *Conceptualizing and measuring energy security : A synthesized approach*. Energy, vol. 36, no. 8, pages 5343–5355, Août 2011. (Cité en page 78.)
- [Sovacool 2020] Benjamin K. Sovacool et Steve Griffiths. *The cultural barriers to a low-carbon future : A review of six mobility and energy transitions across 28 countries*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 119, page 109569, Mars 2020. (Cité en page 72.)
- [Stanton 2007] Elizabeth A Stanton. *The human development index : A history*. PERI Working Papers, page 85, 2007. (Cité en page 109.)
- [Stock 2004] Mathis Stock. *L’habiter comme pratique des lieux géographiques*. Rapport technique, EPFL, 2004. (Cité en page 121.)
- [Surroop 2017] Dinesh Surroop et Pravesh Raghoo. *Energy landscape in Mauritius*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 73, pages 688–694, juin 2017. (Cité en pages 87 et 90.)

- [Surroop 2018a] Dinesh Surroop et Pravesh Raghoo. *Renewable energy to improve energy situation in African island states*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 88, pages 176–183, may 2018. (Cité en page 133.)
- [Surroop 2018b] Dinesh Surroop, Pravesh Raghoo, Franziska Wolf, Kalim U. Shah et Pratima Jeetah. *Energy access in Small Island Developing States : Status, barriers and policy measures*. Environmental Development, vol. 27, pages 58–69, Septembre 2018. (Cité en page 91.)
- [The World Bank 2017] The World Bank. *Access to electricity*, 2017. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>, Last accessed on 2018-16-08. (Cité en page 88.)
- [Theys 2020] Jacques Theys. *Le développement durable face à sa crise : un concept menacé, sous-exploité ou dépassé ?* Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie, vol. 11, no. 2, 2020. (Cité en page 116.)
- [Tibshirani 2001] Robert Tibshirani, Guenther Walther et Trevor Hastie. *Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic*. Journal of the Royal Statistical Society : Series B (Statistical Methodology), vol. 63, no. 2, pages 411–423, 2001. (Cité en page 98.)
- [Tillman 2004] AM Tillman et H Baumann. *The Hitchhikers guide to LCA*. Lund, Sweden : Studentlitteratur AB, 2004. (Cité en page 157.)
- [Tollefson 2018] Jeff Tollefson. *IPCC says limiting global warming to 1.5 C will require drastic action*. Nature, vol. 562, no. 7726, pages 172–173, 2018. (Cité en page 71.)
- [Trotter 2017] Philipp A. Trotter, Marcelle C. McManus et Roy Maconachie. *Electricity planning and implementation in sub-Saharan Africa : A systematic review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 74, pages 1189–1209, jul 2017. (Cité en page 133.)
- [Turkoglu 2015] Handan Turkoglu. *Sustainable development and quality of urban life*. Procedia-Social and Behavioral Sciences, vol. 202, pages 10–14, 2015. (Cité en page 120.)
- [Vergès 1993] Paul Vergès. *D'une île au monde : entretiens avec brigitte croisier*. Editions L'Harmattan, 1993. (Cité en pages 80 et 82.)
- [Villavicencio Calzadilla 2018] Paola Villavicencio Calzadilla et Romain Mauger. *The UN's new sustainable development agenda and renewable energy : the challenge to reach SDG7 while achieving energy justice*. Journal of Energy & Natural Resources Law, vol. 36, no. 2, pages 233–254, 2018. (Cité en page 76.)
- [Voninirina 2014] Amélie Voninirina et Saminirina Andriambeloso. *Étude sur l'énergie à madagascar*. CREAM, 2014. (Cité en page 84.)
- [Walsh 2016] Kevin JE Walsh, John L McBride, Philip J Klotzbach, Sethurathinam Balachandran, Suzana J Camargo, Greg Holland, Thomas R Knutson, James P Kossin, Tsz-cheung Lee, Adam Sobelet *al.* *Tropical cyclones and climate change*. Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change, vol. 7, no. 1, pages 65–89, 2016. (Cité en page 117.)
- [Walsh 2017a] Angélica Walsh, Daniel Cóstola et Lucila C Labaki. *Comparison of three climatic zoning methodologies for building energy efficiency applications*. Energy and Buildings, vol. 146, pages 111–121, 2017. (Cité en page 106.)

- [Walsh 2017b] Angélica Walsh, Daniel Cóstola et Lucila Chebel Labaki. *Review of methods for climatic zoning for building energy efficiency programs*. Building and Environment, vol. 112, pages 337–350, 2017. (Cité en page 106.)
- [Wang 2005] Can Wang, Jining Chen et Ji Zou. *Decomposition of energy-related CO₂ emission in China : 1957 – 2000*. Energy, vol. 30, pages 73–83, 2005. (Cité en page 163.)
- [Wang 2010] Wenchao Wang, Hailin Mu, Xudong Kang, Rongchen Song et Yadong Ning. *Changes in industrial electricity consumption in china from 1998 to 2007*. Energy Policy, vol. 38, no. 7, pages 3684–3690, 2010. (Cité en page 134.)
- [Watin 1991] Michel Watin. *Habiter : approche anthropologique de l'espace domestique à La Réunion*. PhD thesis, La Réunion, 1991. (Cité en pages 121, 122 et 125.)
- [Watin 2010] M Watin. *Loger et habiter à La Réunion*. La Réunion, une société en mutation, Economica, Paris, pages 55–77, 2010. (Cité en page 117.)
- [Wold 1987] Svante Wold, Kim Esbensen et Paul Geladi. *Principal component analysis*. Chemometrics and intelligent laboratory systems, vol. 2, no. 1-3, pages 37–52, 1987. (Cité en page 96.)
- [Wolff 1989] Eliane Wolff. *Quartiers de vie : approche ethnologique des populations défavorisées de l'île de la réunion*. CIIRF-ARCA, 1989. (Cité en page 117.)
- [Wong 2010] Poh Poh Wong. *Small island developing states*. Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change, vol. 2, no. 1, pages 1–6, Septembre 2010. (Cité en page 78.)
- [WWF 2012] WWF. *Diagnostic du secteur énergie à Madagascar*. WWF-Ministère de l'Énergie., page 197, 2012. (Cité en page 84.)
- [Xiaoling, Zhang., Liyin, Shen., Lei 2013] Zhang Xiaoling, Zhang., Liyin, Shen., Lei. *Life cycle assessment of the air emissions during building construction process : A case study in Hong Kong*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 17, pages 160–169, 2013. (Cité en page 171.)
- [Xu 2012] Jin Hua Xu, Tobias Fleiter, Wolfgang Eichhammer et Ying Fan. *Energy consumption and CO₂ emissions in China's cement industry : A perspective from LMDI decomposition analysis*. Energy Policy, vol. 50, pages 821–832, 2012. (Cité en page 134.)
- [Xu 2014] Shi-Chun Xu, Zheng-Xia He et Ru-Yin Long. *Factors that influence carbon emissions due to energy consumption in China : Decomposition analysis using LMDI*. Applied Energy, vol. 127, pages 182–193, 2014. (Cité en page 134.)
- [York 2016] Richard York et Julius Alexander McGee. *Understanding the Jevons paradox*. Environmental Sociology, vol. 2, no. 1, pages 77–87, 2016. (Cité en page 75.)
- [York 2019] Richard York et Shannon Elizabeth Bell. *Energy transitions or additions ? : Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy*. Energy Research & Social Science, vol. 51, pages 40–43, 2019. (Cité en page 76.)
- [Zhang 2013] Ming Zhang, Xiao Liu, Wenwen Wang et Min Zhou. *Decomposition analysis of CO₂ emissions from electricity generation in China*. Energy Policy, vol. 52, pages 159–165, 2013. (Cité en page 134.)

- [Zhang 2015] Ni Zhang, Shelly Campo, Jingzhen Yang, Kathleen F Janz, Linda G Snetselaar et Petya Eckler. *Effects of social support about physical activity on social networking sites : applying the theory of planned behavior*. Health communication, vol. 30, no. 12, pages 1277–1285, 2015. (Cité en page 128.)
- [Zhao 2010] Min Zhao, Lirong Tan, Weiguo Zhang, Minhe Ji, Yuan Liu et Lizhong Yu. *Decomposing the influencing factors of industrial carbon emissions in Shanghai using the LMDI method*. Energy, vol. 35, no. 6, pages 2505–2510, 2010. (Cité en page 134.)
- [Zhou 2014] Guanghui Zhou, William Chung et Yixiang Zhang. *Carbon dioxide emissions and energy efficiency analysis of China 's regional thermal electricity generation*. Journal of Cleaner Production, vol. 83, pages 173–184, 2014. (Cité en page 163.)
- [Ziegler 1999] Felix Ziegler. *Recent developments and future prospects of sorption heat pump systems*. International Journal of Thermal Sciences, vol. 38, no. 3, pages 191–208, 1999. (Cité en page 61.)

Énergie et territoires : **Une approche multi-scalaire de la transition écologique.**

Résumé : Les travaux de recherche présentés dans le cadre cette HDR ont porté sur la compréhension des mécanismes liés à la transition écologique des territoires. La lecture systématique à l'échelle des territoires questionne des approches transdisciplinaires nécessaires à l'analyse et la modélisation des dynamiques de changement . L'objectif de mes travaux a été de développer au sein du laboratoire une autre échelle d'analyse permettant une approche holistique de la transition énergétique et environnementale à l'échelle des territoires. Une première partie présente mes activités d'enseignement et de recherche qui m'ont naturellement conduit à développer ma recherche autour de la thématique de l'énergie. La deuxième partie présente les différentes recherches menées depuis dix ans au sein du laboratoire PIMENT. Nous abordons dans un premier temps la question de la transition au prisme du diagnostic et de potentialités des territoires afin de comprendre les dynamiques en cours et d'évaluer leurs capacités à s'engager dans cette transition. Cette compréhension des territoires à l'aide d'outils d'analyse de données qui nous permettent de formuler des hypothèses de modélisation pour une approche prospective de la transition. Cette étape nous a permis de définir les scénarios plausibles pour différentes îles de l'Océan Indien et d'évaluer les outils de planification qu'il serait nécessaire de mettre en œuvre afin de réussir ce changement. Enfin dans une dernière thématique nous abordons la question de la durabilité des projets d'aménagement, mais plus généralement des espaces bâtis. Cette approche compréhensive de la durabilité s'appuie sur une analyse croisée mêlant les outils réglementaires, la perception des usagers avec les outils d'évaluation environnementale. On s'intéresse ainsi à toutes les phases de la vie des espaces bâtis, du projet à la fin de vie : interrogeant l'identité du mode d'habiter, la qualité environnementale des bâtis, l'impact de l'activité anthropique ainsi que la notion de durabilité des bâtis.

Mots clés : Changement climatique, transition énergétique, énergies renouvelables, analyse prospective, approche multivariée, analyse de cycle de vie, scénarios énergétiques.

Energy and territories : A multi-scale approach to ecological transition.

Abstract : The research work presented in this HDR focused on understanding the mechanisms related to the ecological transition of territories. The systemic reading at the scale of territories questions the transdisciplinary approaches necessary for the analysis and modeling of the dynamics of change. The objective of my work has been to develop within the laboratory another scale of analysis allowing a holistic approach to the energy and environmental transition at the scale of territories. A first part presents my teaching and research activities which naturally led me to develop my research around the theme of energy. The second part presents the various research carried out for ten years within the PIMENT laboratory. We first approach the question of the transition through the prism of the diagnosis and the potentialities of territories in order to understand the dynamics in progress and to evaluate their capacities to engage in this transition. This understanding of territories using data analysis tools that allow us to formulate modeling hypotheses for a prospective approach of the transition. This step allowed us to define plausible scenarios for different islands in the Indian Ocean and to evaluate the planning tools that would be necessary to implement in order to achieve this change. Finally, in a last theme we address the question of the sustainability of development projects, but more generally of built spaces. This comprehensive approach to sustainability is based on a cross-analysis combining regulatory tools, user perceptions and environmental assessment tools. We are thus interested in all phases of the life of built-up spaces, from the project to the end of life : questioning the identity of the way of living, the environmental quality of the buildings, the impact of anthropic activity and the notion of sustainability of the buildings.

Keywords : Climate change, energy transition, renewable energies, prospective analysis, multi-variate approach, life-cycle analysis, energy scenarios.
