



**HAL**  
open science

# L'Analyse de Cycle de Vie au défi de l'urgence climatique : une analyse multi-échelle de la qualité environnementale des bâtiments en milieu subtropical insulaire

Leslie Ayagapin

## ► To cite this version:

Leslie Ayagapin. L'Analyse de Cycle de Vie au défi de l'urgence climatique : une analyse multi-échelle de la qualité environnementale des bâtiments en milieu subtropical insulaire. Construction durable. Université de la Réunion, 2022. Français. NNT : 2022LARE0030 . tel-04052336

**HAL Id: tel-04052336**

**<https://theses.hal.science/tel-04052336>**

Submitted on 30 Mar 2023

**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

**THÈSE DE DOCTORAT**  
SPÉCIALITÉ GÉNIE CIVIL ET ENVIRONNEMENT

Présentée et soutenue par  
**Leslie AYAGAPIN - BERTIL**

---

**L'Analyse de Cycle de Vie au défi de  
l'urgence climatique : une analyse  
multi-échelle de la qualité  
environnementale des bâtiments en  
milieu subtropical insulaire.**

---

Laboratoire PIMENT - 03 Décembre 2022

**Jury :**

*Rapporteurs :* Divya LEDUCQ - Professeure, Université de Lille  
Monica SIROUX - Professeure, INSA de Strasbourg

*Examineurs :* Bastian SCHRÖETER - Professeur, HFT Stuttgart  
Jean Claude GATINA - Professeur Emérite, Université de la Réunion  
Pratima JEETAH - MCF, University of Mauritius

*Direction :* Jean Philippe PRAENE - Directeur - Professeur, Université de la Réunion  
Harry BOYER - Co-directeur - Professeur, Université de la Réunion



---

*"N'ayez pas peur, restez en place et regardez la délivrance que l'éternel va vous  
accorder aujourd'hui"*  
Exode 14 :13

*"Si vous pensez que vous êtes trop petit pour changer quoi que ce soit, essayez donc de dormir avec un moustique dans votre chambre"*  
Betty Reese

à ma famille,

# Remerciements

A mon Directeur de Thèse Jean Philippe et mon Co-directeur Harry pour leur supervision et leur soutien intellectuel,

Aux professeures Divya Leducq et Monica Siroux pour leur rapport,

A mes examinateurs Bastian Schroeter, Jean Claude Gatina et Pratima Jeetah pour leur participation,

A l'Association Nationale pour la Recherche et la Technologie et l'entreprise Fibres Industries Bois pour leur soutien financier,

A Fiona, pour ces moments partagés au sein et hors de l'Université, je garde en tête ces beaux souvenirs,

A Maria et Jessica de l'École doctorale STS, ainsi que Vanessa du Laboratoire PIMENT, pour leur disponibilité,

A Fabienne du Département SBE, merci pour ces bons moments de discussion, et ces échanges qui ont été très important pour moi en cette fin de thèse,

A mes parents Bernard et Micheline, ma soeur Anaëlle, mon frère Phanuel, mon mari Fabrice et mon filleul Erwan, pour leur soutien familial. Merci de m'avoir épauler lors de ces six derniers mois aussi bien sur le plan physique que psychologique. Grâce à vous et à votre soutien infaillible, j'ai pu trouver la force physique et mentale nécessaire pour effectuer ma convalescence dans de bonnes conditions et par la suite me préparer pour ma fin de thèse .

A Miangaly, Mahéva, Eve, Aissah, Jessica, Eva, Laura, Laurence, Aurore, Elodie, Marie-Eve, et à tous ceux et celles qui de près ou de loin m'ont soutenu à leur manière. Merci pour votre soutien inconditionnel, pour votre bienveillance, votre gentillesse, et vos encouragements, surtout ces derniers mois. Ceux-là me va droit au coeur.

Ami(e)s motard(e)s, merci pour ces moments de joies, ces sorties nocturnes, ces balades aux quatre coins de l'île, vous avez été géniaux. Ne l'oubliez jamais, "ride safe" sur les routes.

## Contexte de la thèse

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une bourse CIFRE, en partenariat avec l'Association Nationale de la Recherche et la Technologie (ANRT) et l'entreprise de Fibres Industries Bois.

- ASSOCIATION NATIONALE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE  
33 Rue Rennequin, 75017, Paris, France
- FIBRES INDUSTRIES BOIS  
63 Rue Henri Cornu, ZA Cambaie, 97460 Saint Paul, Réunion
- UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION, LABORATOIRE PIMENT - EA 4518  
120 Rue Raymond Barre, 97430 Le Tampon, Réunion

*Le Laboratoire PIMENT en quelques mots :*

Le Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'environnement et le bâtiment (PIMENT) est une équipe d'accueil couvrant un large spectre de compétences dans les domaines de la Recherche en Thermique du bâtiment, des systèmes énergétiques, du Génie Urbain et des Mathématiques Appliquées. Cette équipe tente d'enrichir son expérience, de capitaliser ses travaux de recherche, de développer de nouveaux concepts et transférer ses connaissances vers les acteurs économiques dans les domaines de l'Habitat, du Génie Civil, du Génie de l'Environnement, de la Thermique du bâtiment, du Génie Énergétique, de l'Ingénierie Mathématique, en s'appuyant sur une connaissance approfondie des phénomènes physiques, thermodynamiques, mécaniques, thermochimiques ainsi qu'en modélisation et simulation des dispositifs et systèmes complexes.

L'activité du Laboratoire se présente selon trois thématiques : « Efficacité Énergétique des Bâtiments, des Quartiers et des Villes », « Énergies Durables », et « Analyse de Modèles et Transferts ». Dans le cadre de sa recherche, le Laboratoire participe également aux différents plans d'actions et de financement de granularités différentes : le « Programme H2020 », la « Stratégie Régionale d'Innovation » (SRI), la « Stratégie de Smart Spécialisation » (S3), les « programmes de l'ANR », les « programmes de l'ADEME », les « lois GRENELLE I et II », les « programmes régionaux et étatiques », le « Plan Climat Énergie Territorial » et la « Gouvernance Énergie pour le territoire ».

Mots clés : énergie, physique du bâtiment, systèmes énergétiques, smart grid, smart building, matériaux, procédés, systèmes innovants, modélisation, conception.

---

*L'entreprise FIBRES INDUSTRIES BOIS en quelques lignes :*

En 1989, une trentaine d'artisans bois réunionnais créent une coopérative : FIBRES SCA. L'objectif premier était de mettre à la disposition des artisans locaux un outil de séchage et de traitement du bois adapté aux conditions extrêmes de l'île.

En 1997, suite aux activités supplémentaires ajoutées telles que l'importation directe et l'usinage, il y a eu la création de FIBRES Négoce (*aujourd'hui FIBRES Industries Bois*). Cette création a permis d'accroître et de pérenniser le développement du groupe FIBRES. FIBRES Industries Bois est une entreprise locale spécialisée aujourd'hui dans l'importation, la transformation et la commercialisation du bois et dérivés bois. Elle propose plus d'une trentaine d'essences aux professionnels locaux tels que les couvreurs, charpentiers, fabricants d'escaliers, menuisiers, agenceurs, ébénistes entreprises générales et également aux particuliers qui travaillent et mettent en œuvre le bois à La Réunion.

En 2000, FIBRES obtient la certification CTB-B+ pour sa station de traitement bois autoclave. Aujourd'hui encore, elle est la seule station de traitement dans l'Océan Indien bénéficiant de cette certification délivrée par le FCBA. Le FCBA permet à l'entreprise locale de garantir la qualité et la durabilité de ses bois traités (*uniquement sur les résineux*).

En 2008, FIBRES SCA est certifiée ISO 14001-2004 par l'AJA. C'est le premier négoce de matériaux bois à La Réunion à obtenir cette certification. Elle permet également à FIBRES de marquer son implication dans une gestion durable et pérenne de ses activités, respectueuse de l'environnement et des hommes.

Enfin, en 2011, FIBRES SCA et FIBRES Industries Bois obtiennent les certifications FSC et PEFC.

Le respect de l'environnement a également toujours tenu une place importante dans le développement du groupe FIBRES. Le groupe s'appuie sur un réseau technique local, national et international pour éco-certifier sa chaîne de contrôle. Ainsi, il y a la garantie du bon suivi des produits certifiés depuis leur exploitation en forêt, en passant par le transport, la transformation et la distribution.

Fort de son expérience et de son engagement envers la protection de l'environnement, l'entreprise locale est labellisée "J'assume mes premiers pas" sur la période de 2021 à 2023, pour les activités "Traitement du bois, usinage de panneaux, de bois et de charpente. Séchage et stockage de bois. Vente en magasin", pour les sites de Cambaie et du Port. Ce programme intitulé assURE, accompagne sur l'île, les industriels dans la mise en place d'un Système de Management de l'énergie.

# Table des matières

# Table des matières

<b>Index des figures</b>	<b>xv</b>
<b>1 Contexte général</b>	<b>1</b>
1.1 La question de l'urgence climatique . . . . .	2
1.1.1 A échelle planétaire . . . . .	2
1.1.2 Situation européenne . . . . .	4
1.1.3 Enjeux nationaux . . . . .	5
1.1.4 Déclinaison régionale . . . . .	8
1.2 Enjeux régionaux . . . . .	10
1.2.1 Cadre environnemental . . . . .	10
1.2.2 Cadre économique . . . . .	11
1.2.3 Cadre énergétique . . . . .	12
1.2.4 Secteur de la construction à la Réunion . . . . .	13
1.3 Réglementations locales pour le secteur de la construction . . . . .	14
1.3.1 La RE 2020 - anciennement RT 2012 . . . . .	14
1.3.2 L'ambition E+C- . . . . .	15
1.4 Précédents travaux de l'analyse environnementale à la Réunion . . . . .	16
1.4.1 Travaux sur la contribution à l'analyse de la qualité environ- nementale d'un projet d'aménagement périurbain/rural en milieu tropical : méthodes et outils d'aide à la décision . . . . .	17
1.4.2 Travaux sur l'intégration de l'Analyse de Cycle de Vie dans l'étude de la production électrique en milieux insulaires . . . . .	17
1.5 Positionnement de la recherche . . . . .	18
1.6 Problématique des travaux de thèse . . . . .	19
1.7 Définition du périmètre de la thèse . . . . .	21
<b>2 État de l'art</b>	<b>23</b>
2.1 Analyse de cycle de vie . . . . .	23
2.1.1 Définition et application du cadre méthodologique de l'ACV . . . . .	23
2.1.2 Normalisation de l'ACV . . . . .	28
2.1.3 Les différents types d'ACV . . . . .	31
2.1.4 Outils et bases de données existantes . . . . .	31
2.1.5 Les limites de l'ACV . . . . .	34
2.2 Approche multiscalair de la méthodologie de l'ACV . . . . .	37
2.2.1 ACV à l'échelle des matériaux en phase structurelle : Secteurs du gros oeuvre et second oeuvre . . . . .	37

2.2.2	ACV à l'échelle des bâtiments : industries de la construction et de l'énergie en phase fonctionnelle . . . . .	39
2.2.3	ACV à l'échelle des quartiers et villes : évaluation environnementale globale . . . . .	40
2.3	Conclusion . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Conception d'un outil d'évaluation des impacts environnementaux</b>	<b>43</b>
3.1	Application de l'ACV des flux matières . . . . .	44
3.1.1	Présentation de la méthodologie du corpus de l'étude . . . . .	44
3.1.2	Procédure de constitution de la base de données régionalisée . . . . .	44
3.1.3	Évaluation de la qualité environnementale des bâtiments à la Réunion . . . . .	51
3.1.4	Résultats . . . . .	56
3.1.5	Ambitions locales pour le secteur de la construction et implications politiques . . . . .	62
3.1.6	La place du bois à travers les ambitions de la neutralité carbone à l'horizon 2050 . . . . .	64
3.1.7	Étude comparative de la construction d'un bâti en bois et d'un bâti en béton . . . . .	75
3.1.8	Conclusion . . . . .	77
<b>4</b>	<b>Approche prospective de l'ACV</b>	<b>79</b>
4.1	Évaluation du total de cycle de vie d'un bâti . . . . .	80
4.1.1	Évaluation de l'ensemble du cycle de vie des maisons individuelles . . . . .	80
4.1.2	Évaluation de l'ensemble du cycle de vie des immeubles . . . . .	83
4.2	Approche prospective de l'ACV : cadre méthodologique . . . . .	86
4.2.1	Contexte énergétique de la Réunion . . . . .	86
4.2.2	Phases considérées . . . . .	86
4.2.3	Catégories d'impacts utilisées pour cette étude . . . . .	87
4.2.4	Matériels et méthodes . . . . .	87
4.2.5	Clustering . . . . .	88
4.2.6	L'approche prospective . . . . .	88
4.2.7	Conception de scénarii énergétiques . . . . .	89
4.3	Résultats et analyses . . . . .	92
4.3.1	Définition des typologies de maisons individuelles à la Réunion . . . . .	92
4.3.2	Impact environnemental des matériaux . . . . .	93
4.3.3	Scénarii énergétiques . . . . .	94
4.3.4	Effet de décarbonisation du mix électrique . . . . .	97
4.3.5	Implications politiques et leviers . . . . .	98
4.4	Conclusion . . . . .	101

---

<b>5</b>	<b>Approches simplifiée et synthétique de l'ACV</b>	<b>103</b>
5.1	Modèles environnementaux réduits . . . . .	104
5.1.1	Mise en place de l'approche ACV-PARETO . . . . .	104
5.1.2	Modèle basé sur la loi PARETO et validation du modèle . . . . .	105
5.1.3	Résultats de l'approche simplifiée de l'ACV . . . . .	105
5.1.4	Conclusion de l'approche simplifiée de l'ACV-PARETO . . . . .	113
5.2	Indicateur Composite Environnemental . . . . .	114
5.2.1	Mesure de la qualité environnementale des bâtiments . . . . .	115
5.2.2	Résultats de l'approche synthétique de l'ACV . . . . .	117
5.2.3	Conclusion de l'approche synthétique . . . . .	119
5.3	Adaptation de la réglementation environnementale à la Réunion . . . . .	120
5.3.1	Les conséquences réglementaires . . . . .	120
5.3.2	Définition du seuil pour la Réunion . . . . .	120
5.3.3	Comparaison entre la France et la Réunion . . . . .	122
5.3.4	Définition des seuils par phase à la Réunion . . . . .	122
5.3.5	Conclusion . . . . .	127
<b>6</b>	<b>Définition d'un nouveau paradigme de durabilité d'un bâti</b>	<b>129</b>
6.1	Questionnement sur la définition de la durabilité d'un bâtiment . . . . .	130
6.1.1	Le bâtiment durable : un concept en évolution . . . . .	130
6.1.2	Vision du bâtiment durable à partir d'une approche globale d'un système complexe . . . . .	136
6.2	De la définition d'un nouveau paradigme de durabilité d'un bâti . . . . .	138
6.2.1	L'ACV : un nouveau regard sur la durabilité des bâtiments . . . . .	138
6.2.2	La place de l'économie verte dans la durabilité des bâtiments . . . . .	139
6.2.3	Limites locales . . . . .	140
6.2.4	Le concept de durabilité au sens large du terme . . . . .	141
6.2.5	Conclusion . . . . .	142
<b>7</b>	<b>Conclusion et Perspectives</b>	<b>147</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>151</b>



# Liste des tableaux

1.1	Impact des émissions de GES à travers 5 matériaux de construction et produits à la Réunion - Focus sur le méthane. <i>Données : Leslie Ayagapin, GEMIS, 2021</i> . . . . .	4
2.1	Outils d'évaluation environnementale à échelle des quartiers et villes	41
3.1	Tableau d'équivalence des indicateurs . . . . .	50
3.2	Transport Extra-pays. . . . .	54
3.3	Statistiques descriptives au niveau de la base de données. <i>Données : Leslie Ayagapin</i> . . . . .	56
3.4	Études de cas similaires. . . . .	58
3.5	Facteurs d'émissions de différents produits pour les maisons individuelles . . . . .	70
3.6	Facteurs d'émissions de quelques produits pour les logements résidentiels . . . . .	73
3.7	Comparaison des résultats pour l'évaluation des impacts environnementaux pour les bâtiments résidentiels . . . . .	74
3.8	Comparaison MI Bois / MI Béton . . . . .	76
4.1	Indicateurs utilisés pour l'étude environnementale des bâtis . . . . .	87
5.1	Statistiques descriptives des résultats de l'ACV sur les 15 premières maisons individuelles . . . . .	106
5.2	Nomenclature . . . . .	108



# Table des figures

1.1	Émissions mondiales de gaz à effet de serre par secteur - source [WRI 2019]. . . . .	3
1.2	Quelques dates clés portant sur les évènements dans la lutte contre le changement climatique . . . . .	5
1.3	Quelques dates clés portant sur les évènements dans la lutte contre le changement climatique à échelle européenne . . . . .	6
1.4	Quelques dates clés sur les réglementations et lois à échelle nationale . . . . .	6
1.5	Objectifs de la RE 2020 . . . . .	10
1.6	Situation géographique de l'île de la Réunion et zonage climatique du territoire . . . . .	11
1.7	Production électrique par sources à la Réunion . . . . .	12
1.8	Organisation du manuscrit . . . . .	21
2.1	Schéma de l'ACV d'un matériau, produit ou système . . . . .	24
2.2	Différents périmètres d'études en ACV . . . . .	28
2.3	Les quatre étapes normalisées de l'ACV . . . . .	30
2.4	Les indicateurs environnementaux et les catégories d'impact . . . . .	30
2.5	Concept général de l'outil . . . . .	33
2.6	Part de la consommation et des émissions mondiales de GES dans le secteur du bâtiment - Global Status Report for Buildings and Construction . . . . .	37
3.1	Localisation des MI et IMM étudiés et évalués dans ces travaux de thèse . . . . .	45
3.2	Exemple de processus spécifique aux territoires insulaires - Cas de la Réunion . . . . .	45
3.3	Chaîne de processus d'un matériau de construction à partir de GEMIS . . . . .	46
3.4	Délimitation du cradle-to-site . . . . .	46
3.5	Indicateurs utilisés dans ces travaux . . . . .	50
3.6	Maison individuelle évaluée à la Réunion. . . . .	52
3.7	Ratio GO/SO d'une maison individuelle à la Réunion. . . . .	52
3.8	Facteur PRD et valeurs moyennes des facteurs d'impacts . . . . .	57
3.9	Impacts des secteurs du GO et du SO pour la France et la Réunion . . . . .	59
3.10	Distribution des PRG des maisons pour la France et la Réunion . . . . .	60
3.11	Part du mix électrique et des transports du GWP pour la France et la Réunion . . . . .	61
3.12	ACV du bois . . . . .	67
3.13	Procédé du traitement autoclave . . . . .	71

4.1	Total cycle de vie des 34 maisons individuelles évaluées à la Réunion	81
4.2	Part des matériaux et produits utilisés pour la construction d'une maison individuelle (en %) . . . . .	82
4.3	Les différentes phases par cycle de vie et par maison . . . . .	83
4.4	Total cycle de vie de 10 immeubles de logements résidentiels évalués à la Réunion . . . . .	84
4.5	Les différentes phases par cycle de vie et par immeuble . . . . .	85
4.6	Synoptique de la méthodologie globale . . . . .	87
4.7	Système énergétique de référence SARI . . . . .	91
4.8	Résultats des clusters pour la définition de la typologie des maisons projetés sur les deux premières composantes principales . . . . .	93
4.9	Résultats globaux du cycle de vie . . . . .	95
4.10	Évolution de la production d'électricité de l'île de la Réunion de 2010 à 2040 . . . . .	96
4.11	Résultats globaux du cycle de vie en tenant compte de la décarbonisation . . . . .	98
4.12	Impact de diminution par indicateur et par phases . . . . .	99
4.13	Évolution de l'impact du mix électrique entre 2010 et 2040 - GWP - kg CO <sub>2</sub> eq . . . . .	100
5.1	Catégories d'impacts utilisées dans le cadre de l'évaluation simplifiée de l'ACV. . . . .	104
5.2	Principaux matériaux de construction et produits utilisés . . . . .	106
5.3	Nombre optimal de matériaux indiqué par l'approche d'inflexion pour évaluation environnementale . . . . .	108
5.4	Comparaison des résultats de l'approche simplifiée et de l'ACV détaillée	112
5.5	Validation du modèle de Pareto sur un nouveau jeu de données avec une intervalle d'incertitude . . . . .	113
5.6	Résultats de l'indicateur environnemental par agrégation équipondérée.	117
5.7	Résultats ICE par la méthode ACP appliquée à chaque phase. . . . .	118
5.8	Résultats de l'ICE par ACP globale . . . . .	120
5.9	Comparaison de la distribution de l'impact environnemental des maisons individuelles et des immeubles pour le GWP - kg CO <sub>2</sub> eq /m <sup>2</sup> . .	121
5.10	Comparaison des impacts carbonés des maisons individuelles et des immeubles pour le GWP en 2031 - kg CO <sub>2</sub> eq /m <sup>2</sup> . . . . .	122
5.11	Comparaison des boxplot des maisons individuelles et des immeubles entre la France et la Réunion pour le GWP - kg CO <sub>2</sub> eq /m <sup>2</sup> . . . . .	123
5.12	Évaluation environnementale des bâtis de type maison individuelle et immeubles résidentiels en tenant compte des seuils prévus pour les 30 prochaines années - kg CO <sub>2</sub> eq /m <sup>2</sup> . . . . .	124

---

5.13	Étiquettes pour l'évaluation environnementale des espaces bâtis (MI) en 2020 en milieu insulaire - Cas de la Réunion . . . . .	124
5.14	Étiquettes pour l'évaluation environnementale des espaces bâtis (MI) en 2030 en milieu insulaire - Cas de la Réunion . . . . .	125
5.15	Étiquettes pour l'évaluation environnementale des espaces bâtis (MI) en 2050 en milieu insulaire - Cas de la Réunion . . . . .	125
5.16	Étiquettes pour l'évaluation environnementale des espaces bâtis (IMM) en 2020 en milieu insulaire - Cas de la Réunion . . . . .	125
5.17	Étiquettes pour l'évaluation environnementale des espaces bâtis (IMM) en 2030 en milieu insulaire - Cas de la Réunion . . . . .	125
5.18	Étiquettes pour l'évaluation environnementale des espaces bâtis (IMM) en 2050 en milieu insulaire - Cas de la Réunion . . . . .	126
6.1	Comparaison de l'impact environnemental d'une MI selon deux configurations . . . . .	137
6.2	Définition du concept de durabilité d'un bâtiment selon cinq thématiques - Première illustration de profil possible . . . . .	143
6.3	Seconde illustration de profil possible . . . . .	144
6.4	Troisième illustration de profil possible . . . . .	145

# Nomenclature

CFC	Chlorofluorocarbure
CO	Monoxyde de carbone
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
CH <sub>4</sub>	Méthane
C <sub>n</sub> F <sub>2n + 2</sub>	Perfluorocarbure
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> F <sub>p</sub>	Hydrofluorocarbure
d	Distance parcourue du mode de transport
d <sub>a</sub> <sup>2</sup>	Distance au carré du centre de gravité du cluster a
d <sub>b</sub> <sup>2</sup>	Distance au carré du centre de gravité du cluster b
E <sub>d</sub>	Durée de vie des matériaux ou produits
E <sub>Dec</sub>	Émission liée à la déconstruction d'un bâti
E <sub>F</sub>	Émission totale de la phase fonctionnelle
E <sub>F<sub>k</sub></sub>	Facteur d'émission de la matière
E <sub>F<sub>DV</sub></sub>	Émission totale de la fin de vie d'un bâti
E <sub>i</sub>	Émission des matériaux ou produits
E <sub>Inc</sub>	Émission liée à l'incinération du produit
E <sub>MEO</sub>	Émission de la mise en oeuvre des matériaux ou produits sur chantier
E <sub>M</sub>	Impact du mix électrique en kWh
E <sub>Rec</sub>	Émission liée au recyclage du produit
E <sub>Reu</sub>	Émission liée à la réutilisation du produit
E <sub>T</sub>	Émission totale du transport
E <sub>Val</sub>	Émission liée à la valorisation du produit
F <sub>i</sub>	L'impact du facteur i
F <sub>E<sub>i</sub></sub>	Facteur d'émission du produit
f <sub>i,national</sub> <sup>j</sup>	Impact du facteur i pour la France
f <sub>i,regional</sub> <sup>j</sup>	Impact du facteur i pour la Reunion
F <sub>E<sub>T</sub></sub>	Facteur d'émission du type de transport du produit
HCl	Chlorure d'hydrogène
HF	Fluorure d'hydrogène
I <sub>a</sub>	Inertie dans le cluster a
I <sub>b</sub>	Inertie dans le cluster b

---

$I_{LCA}$	Valeur de l'indicateur évalué par l'ACV
$Imp_p$	Facteur d'émission du produit en phase de production
$Imp_c$	Facteur d'émission du produit en phase de construction
$I_{Simplified}$	Valeur de l'indicateur évalué par l'ACV simplifié
$l$	La localisation
$m_a$	Nombre de maisons individuelles dans le cluster a
$m_b$	Nombre de maisons individuelles dans le cluster b
$N$	Azote
$NF_3$	Trifluorure d'azote
$N_2O$	Protoxyde d'azote
$NH_3$	Ammoniac
$NO_x$	Oxyde d'azote
$P$	Phosphore
$P_{Dec}$	Quantité de production des ordures ménagères résiduelles en kg
$PO_4^{3-}$	Phosphate
$Sb$	Antimoine
$SF_6$	Hexafluorure de soufre
$SO_2$	Dioxyde de soufre
$U_{Eau}$	Utilisation de l'eau en Litre
$U_{Elect}$	Utilisation de l'électricité en kWh
$U_{Enf}$	Émission liée à l'enfouissement du produit
$q_k$	Quantité de matière



# Glossaire

**Analyse en Composante Principale (ACP)** : méthode statistique permettant d'explorer des données dites multivariées, d'extraire et de visualiser les informations importantes contenues dans une table de données multivariées.

**Analyse de Cycle de Vie (ACV)** : méthode d'évaluation normalisée des impacts environnementaux d'un système complexe ou hyper complexe. Méthodologie permettant de réaliser un bilan environnemental multi-critère et multi-étape d'un système sur l'ensemble de son cycle de vie.

**ACV attributionnelle** : consiste à définir les charges environnementales, les flux entrants et sortants du cycle de vie d'un système.

**ACV conséquentielle** : consiste à décrire les évolutions et changements des flux, qui sont en relation avec certaines prises de décisions.

**Approche multiscalaire** : dans cette thèse l'approche multiscalaire représente les évaluations environnementales qui ont été effectuées à différentes échelles (échelle des matériaux, échelle des bâtiments).

**Approche prospective** : approche permettant de visualiser des futurs possibles en envisageant des scénarii plausibles.

**Bâti (ou espace bâti de type résidentiel)** : dans cette thèse, on appelle "bâti" ou "espace bâti" l'ensemble des bâtiments étudiés tels que les maisons individuelles et les immeubles résidentiels.

**Climat tropical** : type de climat présent dans les tropiques, généralement jusqu'à 14° de latitude nord et sud.

**Décarbonisation (ou décarbonation)** : intégration progressive des énergies naturelles et renouvelables à la place des énergies fossiles ou fissiles.

**Développement durable** : "c'est un développement qui répond aux besoins du présent, sans compromettre la capacité des générations futures répondre aux leurs" *Brundtland*.

**Energie intrinsèque** : quantité d'énergie consommée lors du cycle de vie d'un matériau ou produit hors phase utilisation.

**Energie primaire** : énergie brute non transformée (pétrole brute, lignite, gaz naturel...).

**GES (Gaz à Effet de Serre)** : Gaz atmosphériques contribuant au changement climatique.

**Mix électrique** : dans ce manuscrit, le mix électrique correspond à la production des technologies pour la Réunion.

**Neutralité carbone (ou zéro émission nette)** : capacité d'absorber plus de gaz à effet de serre qu'on puisse en émettre.

**Nouveau paradigme de durabilité** : dans cette thèse, cette notion est traduite par la redéfinition du concept de durabilité d'un bâtiment à travers un socle sur lequel, les aspects que nous considérons importants et indispensables seront à considérer pour définir ce qu'est un bâtiment "durable".

**Phases de l'ACV** : dans ces travaux, lorsque nous parlons des phases, nous faisons référence aux phases structurelles, fonctionnelles et fin de vie des bâtis.

**Phase fin de vie** : cette phase englobe la déconstruction, le recyclage, la réutilisation, et l'enfouissement.

**Phase fonctionnelle** : dans ces travaux, la phase fonctionnelle prend en compte le transport, la mise en oeuvre et le remplacement des matériaux et produits sur les chantiers, et le fonctionnement des bâtis à travers l'énergie principalement.

**Phase structurelle** : dans cette thèse, la phase structurelle prend en compte les phases de production et de construction d'un espace bâti de type résidentiel. Le transport est également inclus.

**SHON** : Somme des surfaces de plancher de chaque niveau moins tout ce qui n'est pas aménageable (combles non-aménageables, sous-sols, toitures-terrasses, garages, balcons).

**Technologies** : systèmes de production utilisés dans cette thèse pour produire de l'énergie (centrales thermiques, barrage hydraulique).

**Territoire insulaire** : contexte géographique isolé d'un territoire : c'est une zone non interconnectée (ZNI).





# Contexte général

---

## Sommaire

<b>1.1</b>	<b>La question de l'urgence climatique</b> . . . . .	<b>2</b>
1.1.1	A échelle planétaire . . . . .	2
1.1.2	Situation européenne . . . . .	4
1.1.3	Enjeux nationaux . . . . .	5
1.1.4	Déclinaison régionale . . . . .	8
<b>1.2</b>	<b>Enjeux régionaux</b> . . . . .	<b>10</b>
1.2.1	Cadre environnemental . . . . .	10
1.2.2	Cadre économique . . . . .	11
1.2.3	Cadre énergétique . . . . .	12
1.2.4	Secteur de la construction à la Réunion . . . . .	13
<b>1.3</b>	<b>Réglementations locales pour le secteur de la construction</b> . . .	<b>14</b>
1.3.1	La RE 2020 - anciennement RT 2012 . . . . .	14
1.3.2	L'ambition E+C- . . . . .	15
<b>1.4</b>	<b>Précédents travaux de l'analyse environnementale à la Réunion</b>	<b>16</b>
1.4.1	Travaux sur la contribution à l'analyse de la qualité environ- nementale d'un projet d'aménagement périurbain/rural en mi- lieu tropical : méthodes et outils d'aide à la décision . . . . .	17
1.4.2	Travaux sur l'intégration de l'Analyse de Cycle de Vie dans l'étude de la production électrique en milieux insulaires . . . . .	17
<b>1.5</b>	<b>Positionnement de la recherche</b> . . . . .	<b>18</b>
<b>1.6</b>	<b>Problématique des travaux de thèse</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>1.7</b>	<b>Définition du périmètre de la thèse</b> . . . . .	<b>21</b>

---

L'objectif de ce chapitre est de positionner ces travaux de thèse dans le contexte global du changement climatique (CC). L'urgence climatique à laquelle nous sommes confrontée aujourd'hui impose la nécessité d'une compréhension des causes et effets de ce dérèglement global. A ce titre, il est important de mesurer et d'évaluer les émissions liées aux impacts environnementaux de l'activité anthropique, afin

de planifier les solutions adéquates. Dans ce contexte, le secteur de la construction est connu pour être particulièrement impactant dans toutes ses phases de cycle de vie. Dans ce chapitre, la situation de ce secteur sera présentée, elle sera suivie du positionnement de la recherche, de la problématique des travaux de thèse et de la définition du périmètre de notre étude.

## 1.1 La question de l'urgence climatique

### 1.1.1 A échelle planétaire

Les impacts environnementaux induits par les activités anthropiques expliquent grandement la forte concentration des émissions de CO<sub>2</sub> présente dans l'atmosphère, soit de l'ordre de 412 parties par million (ppm) selon le site National Geography [Geographic 2021]. Cette concentration en CO<sub>2</sub> est à l'origine d'une augmentation de la température et d'une accélération du réchauffement climatique de 64% de 1990 à 2017 [Datalab 2020]. Parmi ces activités anthropiques, le secteur de l'énergie est une cause qui contribue aux effets du changement climatique avec 73,2% des émissions mondiales. Ces données comprennent l'utilisation de l'énergie dans l'industrie (24,2%), dans la construction et l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments (17,5%) et le transport (16,2%) [WRI 2019].

La figure 1.1 illustre les trois autres secteurs ayant une contribution significative aux émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) qui sont l'agriculture/sylviculture (18,4%), les déchets – décharges et eaux usées (3,2%) et l'industrie – produits chimiques, ciment (5,2%).

Ces chiffres décrivent à travers l'énergie, la combustion de combustibles fossiles pour la production d'électricité et de chaleur comme étant la principale source du changement climatique. En effet, selon le Gouvernement canadien, près de 80% des émissions de GES de sources anthropiques proviennent de la combustion de ressources fossiles et des procédés industriels. L'usage de ces combustibles s'impose principalement dans les secteurs de l'automobile, la production d'électricité, le chauffage et la climatisation des bâtiments [GoC 2020]. Chaque GES présente un potentiel de réchauffement et une durée de vie différente dans l'atmosphère. Les polluants climatiques de courte durée de vie, comme le méthane et les hydrofluorocarbures sont des GES reconnus pour être très impactant et avoir une durée de vie relativement courte.

Par ailleurs, dans son rapport 2021, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a souligné le rôle du méthane dans le réchauffement climatique. En effet, en 2019, les concentrations en CH<sub>4</sub> n'ont jamais été aussi élevées depuis au moins 800 000 ans. Le GIEC indique que le méthane est responsable de 32%

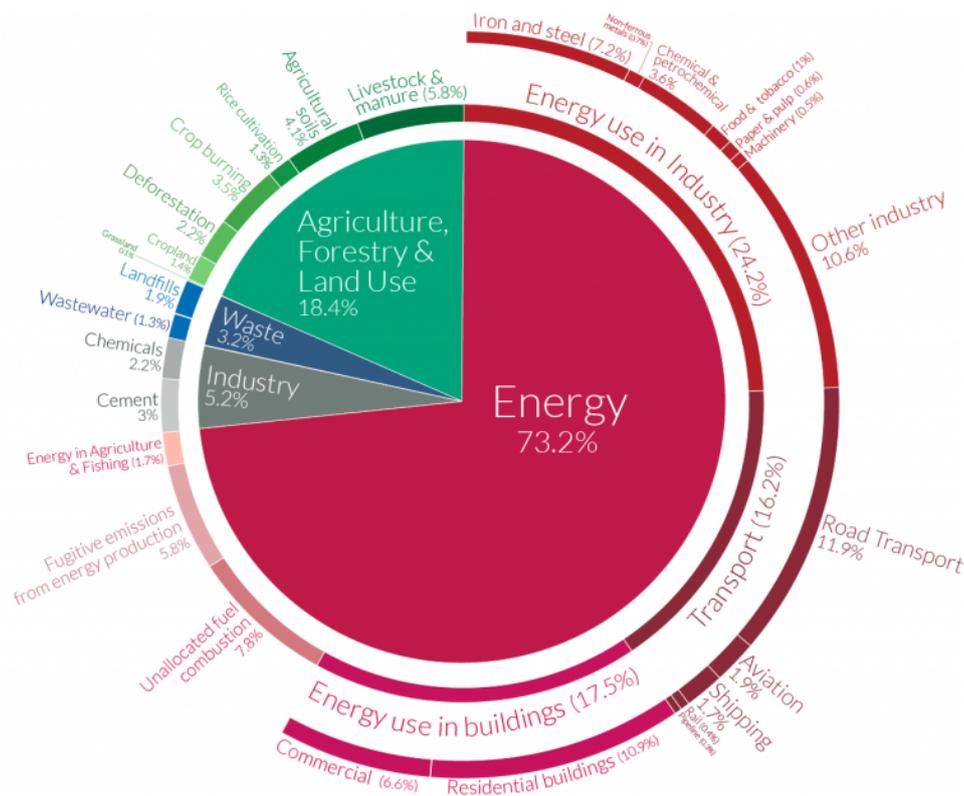


FIGURE 1.1 – Émissions mondiales de gaz à effet de serre par secteur - source [WRI 2019].

du forçage radiatif total. Si 40% des émissions de méthane sont d'origine naturelle par la décomposition de matières végétales en milieux humides, le reste est émis par les activités humaines en agriculture - pour les rizières, la fermentation de l'intestin des ruminants, et l'utilisation de fumier et lisier. Ces émissions sont également présentes lors du traitement des déchets ménagers, du compostage, de l'exploitation, de la distribution et de la consommation de gaz naturels - telles que les fuites et gaz insuffisamment ou non brûlé.

Le méthane d'origine humaine au cours de cette décennie permettrait de maintenir le réchauffement en dessous d'un seuil convenu par les dirigeants mondiaux, à l'instar des industriels. Ces derniers prévoient de remplacer le charbon par le biais de nouvelles énergies comme le gaz naturel liquéfié (GNL) dont la production occasionne des fuites importantes de méthane. Dans le secteur du bâtiment, l'impact du méthane n'excède pas les 2% dans l'impact total des émissions de GES pour divers matériaux de construction et produits comme nous le montre le Tableau 1.1. C'est pourquoi, il y a nécessité dans les études environnementales de croiser les macro-facteurs dans tous secteurs confondus, afin de ne biaiser aucune analyse lors de l'évaluation et de l'interprétation des impacts environnementaux.

TABLE 1.1 – Impact des émissions de GES à travers 5 matériaux de construction et produits à la Réunion - Focus sur le méthane. *Données : Leslie Ayagapin, GEMIS, 2021*

GES	Béton	Acier	Aluminium	Bois
CO <sub>2</sub>	99,94%	99,69%	99,22%	99,30%
CH <sub>4</sub>	0,057%	0,124%	0,180%	0,042%
N <sub>2</sub> O	0,002%	0,001%	0,006%	0,00209%
Perfluorométhane	0,0000009%	0,0000001%	0,0006941%	0,0000001%
Ethane perfluoré	0,0000001%	0%	0,0000916%	0%

Historiquement, le premier bilan de ce groupe d'experts a servi de base scientifique à la Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique sur le climat (CCNUCC) lors du Sommet de la Terre en 1992 1.2 . A cette date, le Protocole de Kyoto fut le premier traité international pour la lutte contre le réchauffement climatique planétaire. Ayant été signé en 1997, il est entré en vigueur en 2005 et a pour but de réduire les émissions de GES – le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, le méthane CH<sub>4</sub>, le protoxyde d'azote N<sub>2</sub>O, l'ozone (O<sub>3</sub>) pour les gaz naturels, et les chlorofluorocarbures, les hydrochlorofluorocarbures, les hydrofluorocarbures et les perfluorocarbures (CFC, HCFC, HFC, PFC) pour les gaz industriels. Ce protocole a permis d'amorcer les négociations internationales environnementales.

### 1.1.2 Situation européenne

Le protocole de Kyoto, vingt ans plus tard, a ouvert la voie à l'échelle internationale aux Accords de Paris lors de la COP 21. Cette COP a eu pour but de fixer l'objectif d'une limitation de l'augmentation moyenne de la température mondiale en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels. S'en est suivie en 2017, de la COP 23, qui s'est tenue à Bonn en Allemagne, présentée et présidée par le Président d'un Petit Etat Insulaire en Développement (PEID). L'objectif de cette conférence a eu pour but d'inciter les états à gravir un échelon supplémentaire dans leur volonté de lutter contre le réchauffement climatique, et de mettre également en avant la vulnérabilité des pays insulaires. Lors de la 25ème conférence des parties en 2019, le Green Deal Européen (GDE) a été présenté et discuté pour la première fois. Ce « pacte vert » est un ensemble d'initiatives politiques, visant à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Afin d'établir un cadre juridique à cet effet, une proposition de loi européenne sur le climat a été publiée en Mars 2020 [EU 2020]. Cette loi vise à atteindre un objectif très précis : celui de la neutralité carbone au sein de l'Union Européenne (UE), en fixant cet objectif contraignant de neutralité carbone d'ici à 2050.

En Octobre 2020, lors d'un vote sur la loi européenne sur le climat, le Parlement Européen a relevé à nouveau cette ambition, appelant à une réduction des

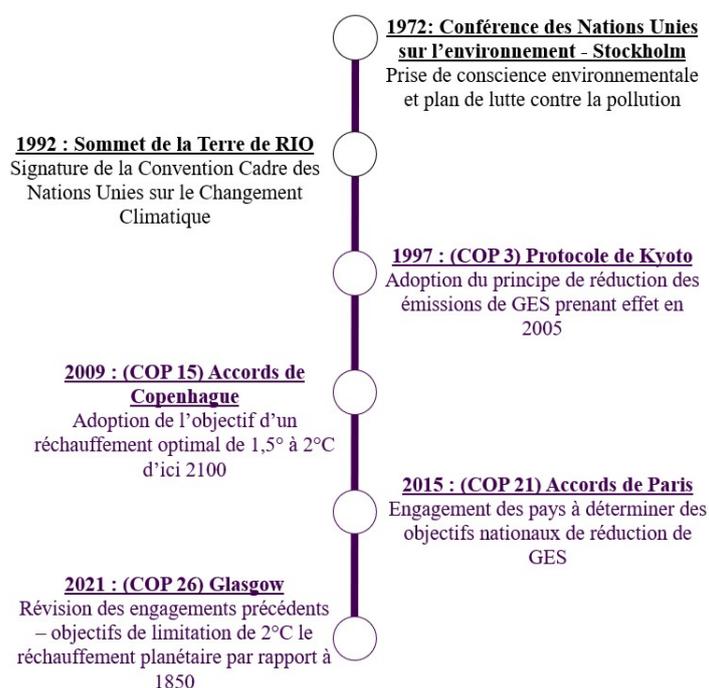


FIGURE 1.2 – Quelques dates clés portant sur les événements dans la lutte contre le changement climatique

GES de 60% en 2030 et a souligné la nécessité d'un objectif intermédiaire pour 2040 [Parliament 2020]. Quelques mois plus tard, en Décembre 2020, la CE a approuvé le nouvel objectif contraignant mais ambitieux de l'UE, pour une réduction intérieure nette des émissions de GES d'au moins 55% d'ici 2030, comme nous le montre la figure 1.3.

### 1.1.3 Enjeux nationaux

L'action gouvernementale française est aujourd'hui pleinement mobilisée dans la lutte contre le changement climatique. Elle tente actuellement de mettre fin à l'exploration de nouveaux gisements d'hydrocarbures sur son territoire : avec l'adoption de la "Loi hydrocarbures" en décembre 2017. Elle s'engage notamment à mettre à l'arrêt les quatre dernières centrales au charbon (France Métropolitaine) à court terme. Elle publie également la révision de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) – anciennement Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV).

Instaurée par la loi du 17 Août 2015, relative à la LTECV, la SNBC ou *National Low Carbon Strategy* est utilisée comme feuille de route pour la France dans le but de conduire la politique d'atténuation du changement climatique. Elle constitue l'un des deux volets de politique climatique française, aux côtés du Plan national d'adaptation au changement climatique. Cette stratégie donne des orientations pour mettre en

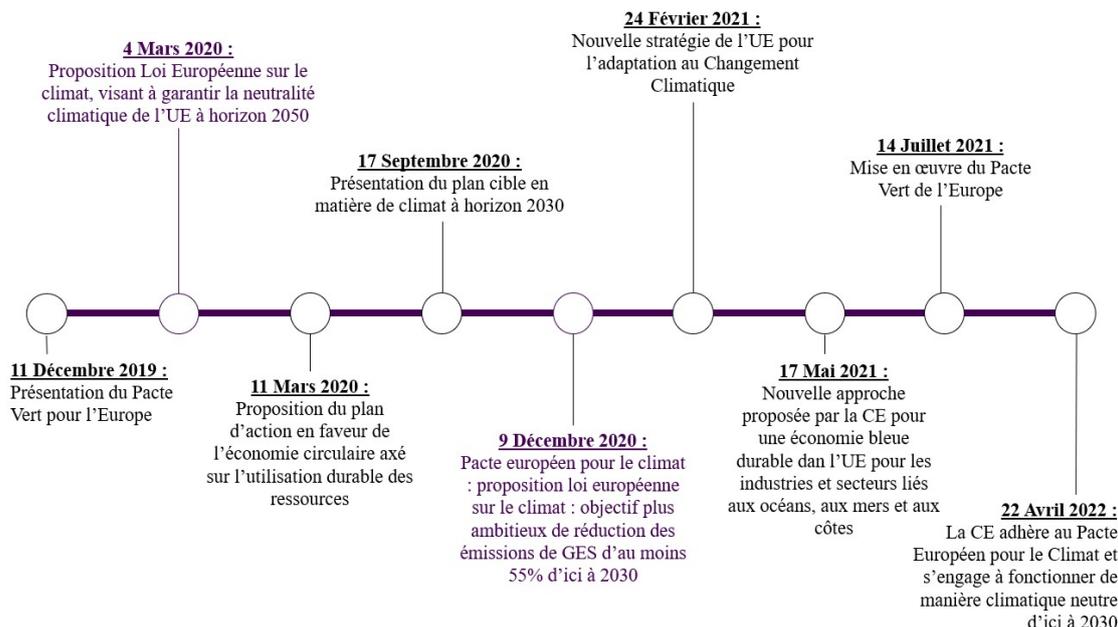


FIGURE 1.3 – Quelques dates clés portant sur les événements dans la lutte contre le changement climatique à échelle européenne

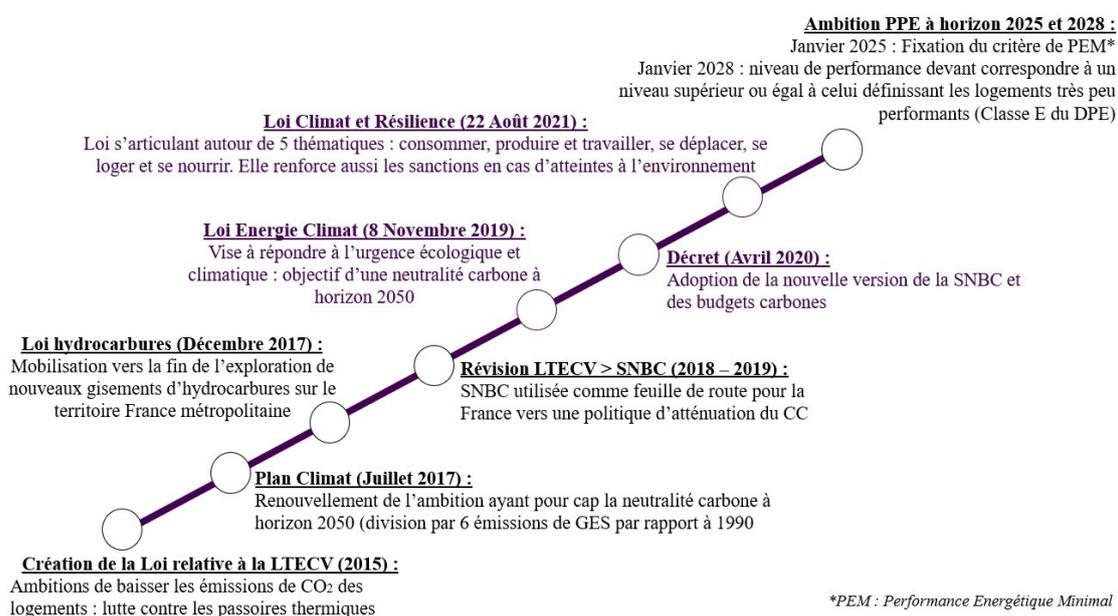


FIGURE 1.4 – Quelques dates clés sur les réglementations et lois à échelle nationale

œuvre, dans tous les secteurs d'activité, la transition vers une économie bas-carbone, circulaire et durable. Cette stratégie nationale définit notamment une trajectoire de réduction des émissions de GES jusqu'à 2050 et fixe des objectifs à court moyen terme.

Elle possède principalement deux ambitions : atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et réduire l'empreinte carbone de la consommation des Français. L'ambition de cette stratégie est revue à la hausse : cette nouvelle version de la SNBC ainsi que les budgets carbones pour les périodes 2019-2023, 2024-2028 et 2029- 2033 ont été adoptés récemment par décret le 21 Avril 2020.

Le Plan climat, présenté quant à lui en juillet 2017, a permis de renouveler l'ambition sur le long terme en France, ayant pour cap la neutralité carbone à horizon 2050, avec une division par 6 des émissions de GES par rapport à 1990. Cet objectif est bel et bien inscrit aujourd'hui dans la loi, et la neutralité carbone constitue un objectif ambitieux, qui selon les travaux du GIEC, serait indispensable à l'échelle mondiale, et ce, dès que possible, pour contenir le réchauffement climatique à 1.5 °C. Pour atteindre cette neutralité carbone, qui consiste à ne pas émettre plus de GES que l'on ne peut en absorber, il existe plusieurs solutions plausibles. Il est nécessaire de décarboner totalement la production d'énergie à l'horizon 2050, et de recourir uniquement à des ressources renouvelables à faible impact carbone. Contenir fortement la consommation énergétique dans tous les secteurs, avec une réduction de plus de 40% par rapport à 2015 est un enjeu majeur. Cette ambition repose sur un renfort de l'efficacité énergétique des systèmes et le développement d'une sobriété énergétique.

Il existe également en France une autre loi : la loi énergie et climat du 8 Novembre 2019 qui vise à répondre à l'urgence climatique. Elle inscrit cette « urgence climatique » dans le code de l'énergie ainsi que l'objectif d'une neutralité carbone à horizon 2050. Les mesures de cette loi prennent en compte la réduction de 40% de la consommation d'énergies fossiles - par rapport à 2012 – d'ici 2030 - contre 30% précédemment. Les mesures comprennent également l'arrêt de la production d'électricité à partir de charbon d'ici 2022, l'obligation d'installation de panneaux solaires sur les nouveaux entrepôts et supermarchés ainsi que sur les ombrières de stationnement. Parmi toutes ces mesures, celle de la sécurisation du cadre juridique de l'évaluation environnementale des projets est également privilégiée, afin de faciliter leur aboutissement, notamment pour l'installation du photovoltaïque, de la filière hydrogène et de l'utilisation de la géothermie avec l'objectif d'atteindre 33% d'énergies renouvelables dans le mix énergétique français d'ici 2030.

A travers toutes ces mesures, la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) fixe à partir du 1er Janvier 2025, un critère de performance énergétique minimal (article 6 de la loi n°89-462 du 6 Juillet 1989), qui deviendra le « niveau de performance minimal » dans le cadre de la définition de la décence des logements. A compter du 1er Janvier 2028, ce niveau devra correspondre à un niveau supérieur ou égal à celui définissant les logements très peu performants (classe E du DPE Diagnostic Performance Énergétique, selon l'article 39). Cette loi considère notamment l'intérêt du secteur du bâtiment dans une économie circulaire. L'article 54 propose de fournir aux maîtres d'ouvrage un outil d'aide à la décision lors de la conception d'un projet de construction, de démolition ou d'aménagement leur permettant d'identifier des

potentiels de changement de destination et d'évolution des bâtiments concernés par l'opération [Legifrance 2019]. Ainsi, lors de la conception des projets ou avant leur démolition, le maître d'ouvrage sera amené à réaliser une étude de potentielle de changement de destination du bâtiment - adossée au diagnostic déchets dans les cas d'une démolition.

#### 1.1.4 Déclinaison régionale

A la Réunion, l'accroissement de la population, l'augmentation de la quantité des énergies fossiles dans le parc de production électrique, l'importation massive de marchandises, et l'accroissement de la consommation d'électricité sont des éléments qui ont contribué à sa vulnérabilité. Le développement socio-économique du territoire a amené à une consommation électrique de plus en plus importante au cours de ces quarante dernières années. Pour répondre au plus vite aux besoins de la population réunionnaise, le mix électrique est passé d'un fonctionnement 100% hydraulique en 1981, à une base d'énergies fossiles à plus de 68% aujourd'hui, comprenant 31,9% de Fioul - Gazoil et 36,8% de charbon - huiles usagées.

Pour faire face à ces problèmes régionaux, plusieurs solutions ont été mises en avant. L'exploitation des énergies renouvelables sur l'île a permis de mettre en évidence la disponibilité ou le manque de moyen financier et matériel pour pouvoir exploiter les ressources renouvelables existantes telles que l'hydraulique, la bagasse, le solaire photovoltaïque, l'éolien et la valorisation des déchets par le biogaz. L'île dispose notamment d'autres potentialités en termes de géothermie, et d'exploitation de l'énergie des mers [Rakotoson 2018a].

L'une des pistes majeures de développement de ces prochaines années concerne la valorisation énergétique des déchets à travers différentes technologies (gazéification, méthanisation et unité de valorisation énergétique). En effet cet axe a été peu exploité et dispose d'un gisement très intéressant. Le Conseil régional a récemment acté la révision de sa Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) visant la neutralité carbone en 2030.

La société ALBIOMA, premier fournisseur d'électricité à la Réunion, à hauteur de 45%, a signé en novembre 2020 un accord décisif avec la Région Réunion pour convertir les deux centrales thermiques bagasse/charbon en bagasse/biomasse. L'accord a prévu également d'intégrer la conversion des moteurs de la centrale du Port Est en biomasse liquide et un déploiement important du photovoltaïque en autoconsommation. L'objectif est d'atteindre 50% d'énergies renouvelables d'ici 2023 dans le mix électrique.

Le projet réunionnais GERRI quand à lui, a pour ambition de faire de la Réunion une île totalement autonome sur le plan énergétique et un laboratoire d'innovations environnementales. Il est basé sur plusieurs axes dont le transport, avec l'objectif de 100% de transport propre d'ici 2030, et l'autonomie énergétique, sans le recours au

nucléaire et sans être reliée à un réseau continental. Cet objectif d'autonomie nécessite cependant le développement de l'électricité photovoltaïque et la mise en chantier d'expérimentations sur les micro-turbines hydrauliques, l'éolien off-shore, ou encore la géothermie - en tenant compte des contraintes topographiques et particularités de l'île telle que la pression foncière. Ce projet cherche à être en pointe principalement sur les nouvelles techniques de stockage de l'énergie, car compter sur les sources renouvelables intermittentes comme le solaire ou l'éolien oblige à trouver des moyens d'assurer une alimentation constante [GERRI 2008].

La lutte contre le changement climatique à la Réunion, passe également par le Schéma Régional Climat, Air, Énergie (SRCAE), défini par la loi du 12 Juillet 2010. Cette loi suit l'engagement national pour l'environnement (Loi Grenelle 2). L'objectif de ce schéma est de définir les orientations et les objectifs à l'échelle de la région et à l'horizon 2050, en matière de lutte contre la pollution atmosphérique, de maîtrise de la demande énergétique, de développement des énergies renouvelables, de réduction des émissions de GES et d'adaptation aux changements climatiques [DEAL 2014].

A la Réunion, les objectifs de maîtrise de la demande en énergie électrique (MDE) de la PPE en vigueur (de 2016 à 2023), doivent contribuer à l'amélioration de l'efficacité énergétique grâce à des projets de réseaux de froid et de climatisation à l'eau de mer des grandes profondeurs, de production solaire thermique, d'isolation, d'équipements des ménages moins énergivore, ainsi que des projets emblématiques de bâtiments tertiaires bioclimatique.

En effet, le secteur du bâtiment est également au coeur des enjeux de la transition énergétique. Ce dernier consomme environ 50% des matières premières, 71% d'électricité, 16% d'eau, et produit 40% des déchets mis en décharge [Oduyemi 2017]. Dans notre contexte insulaire, ce secteur rencontre des difficultés du fait de la faible disponibilité des ressources locales, et de l'éloignement de l'île, expliquant ainsi les importations massives des combustibles fossiles et des matières premières. L'île est totalement dépendante des pays extérieurs pour son approvisionnement. De par la taille de son économie, la Réunion n'a pas d'influence sur les marchés internationaux. Ainsi, elle est particulièrement vulnérable et exposée à la volatilité des prix. Outre sa taille, l'île est notamment contrainte par son climat subtropical, lui obligeant à mettre en place des réglementations locales - type RE 2020, afin de répondre à la fois aux besoins en logements - individuels et collectifs pour sa population grandissante ainsi qu'à leur confort. Elle est à l'initiative de la création de la RTAA DOM pour les DROMs 1.5.



FIGURE 1.5 – Objectifs de la RE 2020

## 1.2 Enjeux régionaux

### 1.2.1 Cadre environnemental

La Réunion, est un département français qui possède un relief montagneux. Particulièrement marqué, l'île connaît un grand nombre de microclimats couvrant une superficie de 2512 km<sup>2</sup>. Elle est caractérisée par un climat subtropical avec deux saisons : l'été - de novembre à avril, et l'hiver - de mai à octobre. Ce climat très contrasté reflète une répartition inégale des précipitations entre la "côte au vent" de l'Est, celle qui est la plus exposée aux alizés et la plus humide, et la "côte sous le vent" de l'Ouest, plutôt abritée par les hauts reliefs de l'île, avec de faibles précipitations [Bénard-Sora 2016]. On peut ainsi observer, de la côte vers les hauts de l'île, un gradient de température d'environ  $-0.7^{\circ}\text{C}$  tous les 100 mètres. Cela montre ainsi une différence importante entre les deux zones géographiques.

La population réunionnaise a été estimée à 859 959 habitants en 2020 [IEDOM 2019], ce qui représente environ 1,28% de la population française. La croissance démographique de l'île ralentit sensiblement depuis environ 12 ans, avec une baisse progressive du taux de natalité. La population réunionnaise se concentre principalement sur le littoral à une altitude en dessous de 400 mètres. Selon Jauze., l'île a la particularité de « l'inversion » de son centre et de sa périphérie : « Nous sommes dans une île où le centre est la périphérie, et la périphérie est le centre » [Jauze 1998]. En effet, il y a une concentration de la population réunionnaise d'environ 85% sur le

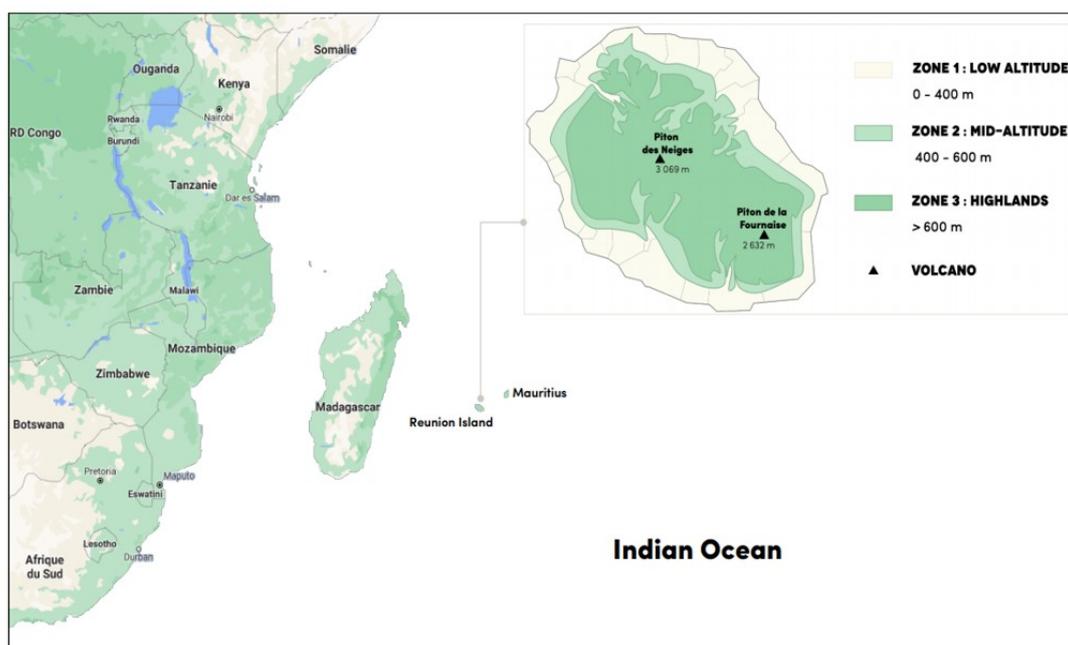


FIGURE 1.6 – Situation géographique de l'île de la Réunion et zonage climatique du territoire

littoral et les basses pentes de l'île, en dessous des 600 mètres d'altitudes, soit un tiers de la surface totale. La topographie de l'île explique en partie cette organisation périphérique et ce déséquilibre entre les hauts et les bas.

### 1.2.2 Cadre économique

En 2008, la crise économique mondiale a fortement affaibli le territoire. L'économie réunionnaise a connu une baisse du PIB et des revenus jusqu'en 2013. Quatre ans plus tard, en 2017, l'évènement des gilets jaunes a entraîné à nouveau une baisse du PIB en 2018. Cependant, la croissance s'est légèrement redressée de 2,2% en volume en 2019 [TER 2019].

Le PIB par habitant à La Réunion a progressé en 2019 de plus 2,5% en valeur, soit au même rythme qu'au niveau national. L'île de la Réunion présente ainsi toutes les caractéristiques d'une économie insulaire moderne, mais en raison de son isolement géographique, cette dernière est très dépendante des importations pour l'approvisionnement en matières premières et en produits. Nous soulignons notamment que les exportations ont été très dynamiques en 2019, +7,4%, soit 361 millions d'euros, malgré une importation bien plus importante à hauteur de 5,3 milliards d'euros de biens.

### 1.2.3 Cadre énergétique

L'une des caractéristiques communes à toutes les petites îles est leur forte dépendance aux ressources fossiles importées pour la production d'électricité [Lee 2020]. La Réunion, comme la plupart des économies insulaires, a une production d'électricité carbonée, voir la figure 1.7. Jusqu'en 1984, les besoins électriques de la population réunionnaise ont été presque entièrement assurés par les énergies renouvelables, grâce notamment à l'hydroélectricité.

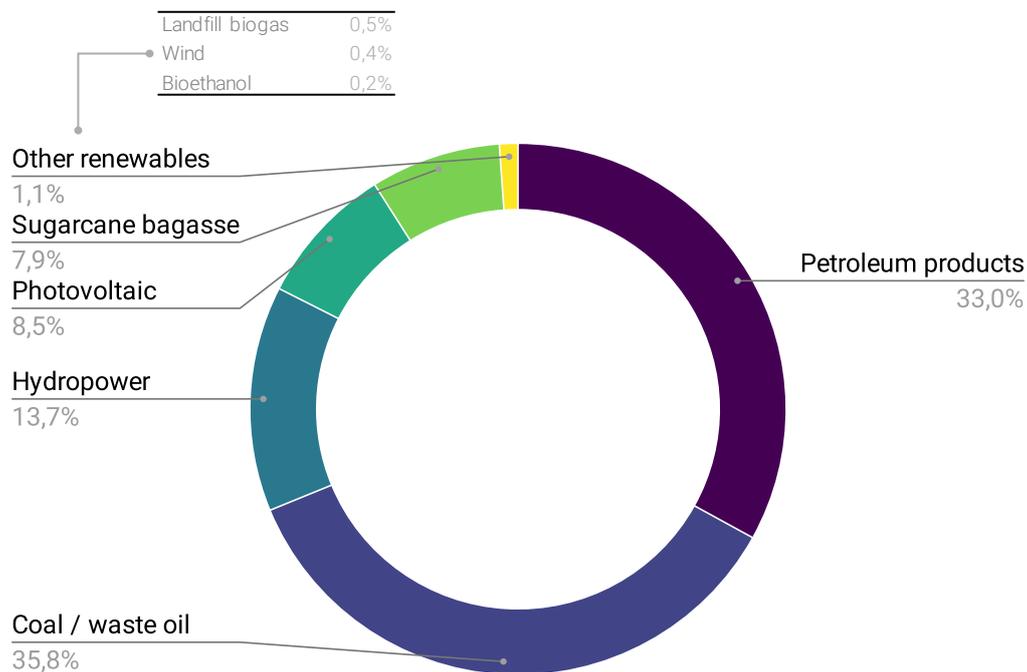


FIGURE 1.7 – Production électrique par sources à la Réunion

A partir des années 1980, la part des énergies fossiles a connu une augmentation progressive dans la production électrique de l'île, pour répondre aux besoins de la population et du développement des activités économiques. Le recours à l'importation des énergies fossiles s'est imposé en partie du fait d'une croissance démographique et du niveau d'équipement des ménages. L'urgence de la réponse à un besoin énergétique a plutôt favorisé les déploiements de solutions rapides dans leur mise en oeuvre essentiellement carbonées.

La Réunion est caractérisée par un mix électrique très diversifié depuis près de 20 ans. L'électricité est produite majoritairement à partir du charbon (24,1% en 2019), du fioul lourd et du gazole. Le cas du charbon est singulier car il prend le relais de la bagasse qui n'est utilisée que pendant la campagne sucrière de juillet à décembre.

Avec une production électrique de 3046,9 GWh en 2019 selon le Bilan Énergétique de la Réunion (BER), la part des énergies renouvelables s'élève ainsi à 31,2%. Cette part peine à décoller depuis les années 2000 et oscille toujours entre 30 et 37% en 20 ans. Cependant, cette faible évolution de la pénétration des ENRs dans le mix électrique ne traduit pas l'ambition réelle portée par les politiques locales quant à atteindre rapidement une autonomie électrique [Praene 2012]. Au début des années 2000, une politique régionale volontariste a visé au déploiement des énergies renouvelables dans le mix électrique.

Cette volonté d'autonomie énergétique n'est ni plus ni moins que la traduction d'une intention politique exprimée dans le "Plan Immédiat de Survie" de 1975, défini par le parti communiste réunionnais [PCR 1975]. Le PRERURE initié par Paul VERGÈS, a ensuite défini en 2000 une feuille de route pour atteindre l'objectif d'autonomie énergétique en 2025. La part des énergies renouvelables a légèrement augmenté, passant ainsi de 33,8% en 2010 à 36,5% en 2018. Cette faible croissance apparente est également due à la croissance démographique soutenue et besoin soutenu du secteur économique. La part des ENRs s'explique pour l'heure essentiellement du fait de la production hydroélectrique relativement stable qui représente 15 à 20% de la production totale.

En 20 ans, la consommation d'électricité a atteint 2724 GWh. Malgré ce contexte, La Réunion s'est toujours inscrite dans une dynamique et la volonté de s'engager dans la transition énergétique avec le Plan Régional des Énergies Renouvelables et de l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie. Cette volonté de décarbonisation trouve aujourd'hui un nouveau souffle à travers l'obligation d'arrêt des centrales utilisant le charbon. Ainsi la Réunion qui utilise un mix Bagasse/Charbon pour ces centrales thermiques du Gol et de Sainte Suzanne, va remplacer d'ici 2023 le charbon par de l'écorce, connu sous le nom de « green pulp ». Toutefois, cette biomasse importée est problématique car malgré l'absence de ressources fossiles, il faudra considérer l'importation de ressources (qui est cette fois-ci l'écorce). Par conséquent, il y aura toujours une vulnérabilité énergétique, du fait de cette importation. Un récent accord entre la Région Réunion et les services de l'Office National des Forêts (ONF) étudie la possibilité de mettre en place une filière biomasse forestière dédiée à la production énergétique.

#### 1.2.4 Secteur de la construction à la Réunion

Le secteur de la construction à La Réunion se développe dans les années 60, porté principalement par une urbanisation grandissante et la construction de nouveaux logements, soit 15% de l'emploi contre 10% en 1954. Son poids dans l'économie réunionnaise diminue par la suite dans les années 70 mais connaît un renouveau grâce à la loi de défiscalisation de 1986 [INSEE 2016]. L'arrêt de ce dispositif dans les années 90 a cependant freiné le secteur de la construction.

Depuis 2007, le secteur de la construction rencontre des difficultés du fait de la fin des grands travaux, et des incertitudes autour de la Loi pour le développement économique des outremer, ainsi que la crise économique mondiale en 2008.

Dix ans plus tard, selon la Cellule économique du bâtiment et des travaux publics, le secteur de la construction à La Réunion diminue à nouveau de 5,4% en 2019, après deux années de croissance (+3,9%) en 2018 et (+7,9%) en 2017 [BTP 2021].

Cependant, malgré ce retrait des commandes publiques, il y a eu également les contraintes du vieillissement de la population réunionnaise et la tendance à l'habitat séparé qui impliquent malencontreusement un fort besoin en logements, notamment en petits logements [IEDOM 2019]. Le nombre d'autorisations de permis de construire a diminué en 2019 à -4,2% comme en 2018 [IEDOM 2019]. Le faible nombre d'autorisations de projets de logements collectifs (-11,3%) explique en grande partie ce recul. Selon de récentes projections de l'INSEE, nous devons construire près de 168 900 logements d'ici 2035 [INSEE 2018]. Ainsi, l'aménagement du territoire appelle donc à l'anticipation des politiques publiques.

## 1.3 Réglementations locales pour le secteur de la construction

### 1.3.1 La RE 2020 - anciennement RT 2012

Comme l'indique le guide de la RE 2020, "la réglementation environnementale des nouvelles constructions de bâtiments entrera en vigueur à compter du 1er Janvier 2022 et remplacera progressivement la réglementation thermique 2012."

La RE 2020 est une nouvelle réglementation qui concerne les prochaines constructions neuves, afin qu'elles soient plus respectueuses de l'environnement. Elle vise principalement les logements individuels, collectifs et les bâtiments du secteur tertiaire. La RE 2020 introduit un plafond d'émissions de GES pour les maisons individuelles, fixé à 4 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> par an. Le plafond pour les logements collectifs est plus élevé. Il est fixé à 14 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> par an dès son entrée en vigueur, avant de diminuer à 6 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> par an en 2024. L'application de cette réglementation se fait progressivement, avec un temps d'adaptation sur la période 2020-2024. Cependant, les exigences environnementales vont progressivement augmenter, c'est-à-dire :

- moins de 15% de contenu carbone en 2024 ;
- moins de 25% en 2027 ;
- et moins de 30 à 40% en 2030.

Cette Réglementation de la RT 2012 en France, devenue RE 2020, est applicable uniquement aux constructions neuves. La RTAA-DROM s'intéresse principalement à 3 aspects :

- l'aération, qui prend en compte la ventilation naturelle à l'intérieur des bâtis et l'isolement acoustique ;
- l'acoustique, qui prend en compte la protection contre les bruits intérieurs – isolation acoustique des murs - planchers et contre les bruits extérieurs de type isolement acoustique du bâtiment ;
- et la Réglementation thermique, qui prend en compte la ventilation naturelle, la porosité des façades, et l'énergie solaire.

Au même titre que la RTAADROM, il est évident qu'une adaptation de la RE 2020, sera nécessaire pour les régions outre mers. La prise en compte de la situation géographique, des modalités de construction en lien avec des modes d'habiter très différents permettront d'ajuster les seuils de performance environnementale en conséquence.

### 1.3.2 L'ambition E+C-

A la Réunion, se pencher sur une démarche de protection de l'environnement et d'architecture écologique, amène à penser aux bâtiments durables. Cependant, le questionnement sur le concept d'un bâtiment durable ne converge pas vers un consensus de sa définition. Plusieurs appellations existent telles que :

- **le bâtiment bas carbone** (réduction de l'empreinte carbone par la sobriété énergétique, les énergies renouvelables, le développement de matériaux biosourcés et la réduction de l'impact de la construction) ;
- **le bâtiment basse consommation** (Label BBC) (basse consommation d'énergie pour le chauffage, la climatisation, l'éclairage, l'eau, l'ECS et la ventilation) ;
- **le bâtiment à énergie positive** (BEPOS) (conçu pour produire en moyenne plus d'énergie qu'il n'en consomme) ;
- **le bâtiment à haute efficacité énergétique** (production à moindre coût, et à moindre impact écologique, un confort thermique assuré par des économies d'énergies) ;
- **le bâtiment à haute qualité environnementale** (Label HQE) (conception ou rénovation de bâtiment et de villes limitant le plus possible leurs impacts sur l'environnement) ;
- **le bâtiment neutre en carbone** (arriver d'ici la seconde moitié du siècle à ne pas émettre plus de GES que nous ne sommes capable d'en absorber) ;
- **le Green Building** (réduire l'impact écologique : améliorer l'isolation, mettre en place des générateurs d'énergies renouvelables de types PV, mettre en place des processus d'économies en eau, pour rendre le bâtiment plus écologique).

Ces différentes appellations énumérées ci-dessus soulignent la difficulté à définir véritablement ce qu'est un bâtiment dit « durable ». Parmi les nombreux labels

existants, le Label BBC (utilisé à l'échelle nationale) permet d'attester l'exemplarité de l'empreinte carbone d'un bâtiment. Son dispositif est le suivant : pour pouvoir bénéficier de ce label, il est impératif de réduire les émissions de GES sur le cycle de vie des bâtis, et ce, grâce à une construction réfléchie et à une exploitation maîtrisée du bâti. Ce label couvre également l'indicateur de l'économie circulaire, qui considère le réemploi de produits lors de la construction, de la mutualisation des espaces, du potentiel de changement d'usage du bâtiment et du potentiel d'extension du bâtiment. L'extension de ce label est délivrée à deux étapes : lors de la conception (label provisoire) et après la réalisation (label définitif).

En 2013, il a été attribué à la ville de Saint Pierre, le label « écoquartier », lors d'un programme de rénovation urbaine (ANRU), qui comptabilisait la construction de près de 800 logements (dont 50% sociaux) pour 70 000 m<sup>2</sup> de SHON, ainsi que la résidentialisation de la quasi-totalité du parc de l'habitat social (1139 logements) à Ravine Blanche. Ces labels et programmes sont au niveau national et se déclinent au niveau régional. Un an plus tard, en 2014, dans le nord de l'île, sur le site du Campus du Moufia a été construit un amphithéâtre de 1500 m<sup>2</sup> de surface nette. Cet amphithéâtre a été pensé comme un théâtre en plein air, qui fonctionne en ventilation naturelle. Sa conception bioclimatique innovante, qui consiste à trouver le point d'équilibre entre la construction, le comportement de ses occupants ainsi que son contexte géographique, a permis en partie aux usagers d'être en situation de confort sans recours à la climatisation. Cet amphithéâtre entre alors dans le cadre des bâtiments à faible impact environnemental de l'Université de la Réunion.

Le label BEPOS vient répondre quant à lui au stade de fonctionnement, où l'utilisateur recourt plutôt à la ventilation naturelle et aux énergies renouvelables qu'à la climatisation et l'utilisation de l'électricité carbonée.

À la Réunion, la fin de vie des bâtiments n'est cependant pas ou peu explorée. En effet, lors de la démolition de ces derniers, la plupart des déchets partent en enfouissement ou sont exportés vers l'extérieur du territoire. Une très petite quantité de déchets est transformée et est réutilisée à ce jour sur l'île. Les déchets du BTP à la Réunion restent difficilement quantifiables et le manque de traçabilité sur leur suivi en fin de vie permet difficilement de faire une évaluation environnementale.

## 1.4 Précédents travaux de l'analyse environnementale à la Réunion

Au sein du Laboratoire PIMENT, au cours de ces dix dernières années, deux thèses et une HDR ont permis de discuter de la place de l'analyse environnementale et énergétique sur notre territoire. La première thèse a été axée sur l'ACV d'un bâtiment spécifique - type écoferme (2013 - 2017) [Hoarau 2017], et la seconde thèse (2015 - 2018) a

été axée sur l'ACV en énergie dans différents territoires insulaires [Rakotoson 2018b]. Ces deux thèses sont présentées brièvement ci-dessous et mettent en exergue l'évaluation environnementale d'un bâti spécifique et de la production d'énergie en milieu insulaire. Les travaux de Jean Philippe Praene dans le cadre de son HDR a été quant à elle axée sur la compréhension des mécanismes liés à la transition écologique des territoires. La lecture systémique à l'échelle des territoires dans le cadre de cette HDR a questionné des approches transdisciplinaires nécessaires à l'analyse et la modélisation des dynamiques de changement. [Praene 2020].

#### **1.4.1 Travaux sur la 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**

La thèse de Christelle Hoarau a porté sur la contribution à l'analyse de la qualité environnementale d'un projet d'aménagement périurbain/rural en milieu tropical. L'objectif de sa thèse au sein du Laboratoire a été d'accompagner l'aménagement d'un site en milieu péri-urbain insulaire, autour d'activité des secteurs primaires, secondaires, tertiaires et résidentiels. Dans le cadre de ses travaux, plusieurs outils d'analyse ont été développés pour répondre aux exigences d'un éco-aménagement à partir d'analyses techniques, environnementales et d'évaluation globale. Le but de ce développement d'outils a été envisagé afin de permettre aux acteurs d'aménagement du territoire, d'analyser le bilan carbone d'un projet et d'évaluer différentes alternatives d'aménagement. Au-delà de la proposition de ces outils, cette thèse a également proposé une démarche méthodologique basée sur l'approche systémique et typologique – avec application de la norme ISO 14044, relative à l'ACV.

#### **1.4.2 Travaux sur l'intégration de l'Analyse de Cycle de Vie dans l'étude de la production électrique en milieux insulaires**

La thèse de Vanessa Rakotoson a porté sur l'intégration de l'Analyse de cycle de vie dans l'étude de la production électrique en milieux insulaires. L'objectif de sa thèse au sein du Laboratoire a été de quantifier les impacts environnementaux liés à la production d'électricité dans les espaces insulaires, principalement à La Réunion, afin d'établir un diagnostic territorial. Dans le cadre de ses travaux, les centrales de production d'électricité du territoire ont été évaluées grâce à l'ACV et suivant la norme ISO 14044 sous différents impacts environnementaux. Le but de cette thèse est de mettre en place un outil d'évaluation adapté à tout territoire, permettant alors d'identifier les étapes et les processus fortement contributeurs pour la production

de 1 kWh électrique. Les résultats obtenus servent de points de repère pour l'élaboration de scénarios de production, établis dans une démarche de type « modélisation prospective ». Au-delà de cette démarche, cette thèse propose huit scénarios développés pour répondre aux contraintes environnementales, techniques, sociales et économiques.

Les différents travaux du Laboratoire présentés ci-dessus portant sur l'analyse environnementale à La Réunion ont permis d'évaluer le bilan carbone d'un bâti spécifique (type Eco-ferme) dans l'ensemble de son cycle de vie, et également d'évaluer l'impact de la production d'énergie en milieu insulaire. Enfin, l'HDR a permis au Laboratoire de comprendre la place de l'analyse environnementale autour de la question du métabolisme territorial.

## 1.5 Positionnement de la recherche

Au niveau national et en partenariat auprès des professionnels du secteur de la construction, deux axes sont développés pour la France métropolitaine : les bâtiments à énergie positive et la réduction de l'empreinte carbone. C'est ainsi que le label E+C- a fait son apparition. Ce label se distingue des autres labels environnementaux tels que les labels HQE, BBC, qui sont en application dans le secteur du bâtiment.

En effet, ce label E+C- repose plutôt sur une nouvelle méthode de calcul basée sur deux indicateurs : le bilan BEPOS – bilan énergétique du bâtiment à énergie positive, ou il s'agit de vérifier que la construction produit plus d'énergie renouvelable que ce qu'elle consomme, et le bilan carbone, qui correspond à la performance environnementale - qui quantifie les GES émis par le bâtiment dans sa globalité ainsi que ceux engendrés par les différents matériaux et éléments utilisés. Il prend en compte le cycle de vie du bâtiment.

Pour chacun de ces indicateurs, il existe différents niveaux de performance. On comptabilise quatre pour le bilan BEPOS et deux pour le bilan carbone. Ces derniers se combinent entre eux. Ainsi, le bilan énergétique propose les niveaux suivants tels que :

- l'énergie 1, où la consommation est inférieure de 5% par rapport à la RT 2012 ;
- l'énergie 2, où la consommation est inférieure à 10% par rapport à la RT 2012 ;
- l'énergie 3, où cette fois-ci, la consommation est inférieure à 20% par rapport à la RT 2012 ;
- et enfin l'énergie 4, où le bilan énergétique est nulle. Puis, pour le bilan environnemental, les deux niveaux de performances exigent avec le carbone 1, une empreinte carbone maximale de 1350 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> pour un bâtiment résidentiel ainsi que 1550 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> pour les bureaux et l'empreinte carbone 2, avec un seuil ne dépassant pas les 800 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> pour le résidentiel et 950 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> pour les bureaux ;

Par conséquent, la problématique n'est pas de favoriser uniquement la performance énergétique des bâtiments, mais d'aller plus loin en évaluant la performance environnementale des bâtiments [Advisor 2021]. L'objectif est donc de parvenir à généraliser les bâtiments bas carbone grâce à un système de niveaux de performance très précis. Sont alors éligibles au label E+C-, les bâtiments neufs qui répondront aux exigences de la norme RT 2012 situés en France métropolitaine.

Le Label E+C- permet grâce à la mise en place de la RE 2020, de lutter contre le dérèglement climatique, et de limiter également les émissions de carbone et la consommation en énergie. Cependant, ces seuils ne pourront être appliqués directement au cas des territoires insulaires français y compris la Réunion. Une adaptation des seuils devra donc être considérée en tenant compte de leurs nombreuses particularités.

A la Réunion, le Laboratoire de Physique Ingénierie Mathématiques pour l'Énergie, l'environnement et le bâtiment (PIMENT) développe des travaux de recherche dans des champs d'application tels que l'efficacité énergétique des bâtiments et quartiers sous les climats chauds et tropicaux et les zones non-interconnectées ; les énergies durables sous climats chauds et tropicaux et en Mathématiques Appliquées. Au cours de ces vingt dernières années, l'un des axes du laboratoire a permis d'apporter des solutions scientifiques en matière de performance énergétique des bâtiments tout en tenant compte du confort thermique des usagers en milieu insulaire. Plus récemment la question de l'analyse environnementale autour des thèmes de l'énergie et des espaces bâtis a émergé au sein du laboratoire. La démarche dans le cadre de ces travaux se veut multi-scalaire afin d'avoir une approche systémique de l'analyse environnementale allant du matériau au bâtiment.

## 1.6 Problématique des travaux de thèse

L'Europe ambitionne depuis peu la neutralité carbone. La France et la Réunion s'inscrivent également dans cette démarche environnementale. Comme nous l'avons souligné dans l'introduction générale, la SNBC prévoit la décarbonation quasi-complète des secteurs du transport, de l'énergie et du secteur du bâtiment d'ici 2050.

Globalement, La Réunion tente de se tourner depuis 20 ans vers une autonomie énergétique et se lance également à travers le programme « Green Révolution La Réunion île solaire et terre d'innovation » afin de viser :

- au développement des ressources renouvelables ;
- au déploiement de nouveaux moyens de déplacements grâce à la modernisation des réseaux de transport en commun ;
- à la maîtrise également de la consommation des énergies par les familles et industries ;
- et d'arriver à construire davantage de logements résidentiels tout en maîtrisant

son impact environnemental grâce à la définition d'un seuil d'impact local, établi à partir de son contexte et ses contraintes.

La problématique générale de cette thèse pourrait s'énoncer comme suit :

*Comment intégrer l'ACV dans la compréhension de la qualité  
environnementale des projets de construction en milieu subtropical  
insulaire ?*

Cette appropriation passe alors par la capacité d'évaluer les projets à venir en bâtiment et quartiers/villes. Pour répondre à cette problématique, quatre approches méthodologiques ont été menées :

- La première, est une approche holistique, nous ayant permis de passer de la généralisation à la régionalisation des données d'inventaires pour les territoires insulaires. Il y a eu nécessité de prendre en compte le contexte géographique isolé de notre territoire pour la caractérisation des bâtiments – diagnostic de l'existant. Ce diagnostic nous a permis de mettre en évidence le surcoût environnemental existant entre la France métropolitaine et la France outre-mer dès la phase structurelle d'un bâti ;
- La seconde, est une approche prospective, qui nous a permis de mettre en œuvre des scénarii pour la décarbonisation du mix électrique local d'ici à 2040, afin de mettre en évidence l'impact fonctionnel d'un bâti à travers sa consommation électrique. Ce champ nous a permis également de voir comment la décarbonisation du mix local influe sur la qualité environnementale dans la phase fonctionnelle d'un bâti ;
- La troisième, est une double approche : simplifiée et synthétique des données de l'ACV : dans un premier temps, l'approche simplifiée nous a permis de mettre à disposition des acteurs locaux une évaluation d'impact fiable grâce à une méthodologie simplifiée d'analyse, *au lieu d'une analyse complexe détaillée de l'ACV*, et dans un second temps, l'approche synthétique, nous a permis de mesurer la qualité environnementale d'un projet grâce à un seul et unique indicateur composite environnemental : l'ICE ;
- Enfin, la quatrième et dernière approche, questionne l'ambition de la neutralité carbone à travers la définition d'un nouveau paradigme de durabilité d'un bâtiment à La Réunion. Dans l'optique d'une économie circulaire, notre objectif a été de mettre en évidence le fait que les décisions prises lors de la construction d'un bâtiment doivent considérer l'ensemble de son cycle de vie afin de pouvoir anticiper la fin de vie de ce dernier à travers sa déconstruction et sa capacité à s'autorecycler en fin de vie. Nous avons également souligné le fait qu'un bâtiment durable ne s'arrête pas autour des trois principaux piliers du développement durable, mais qu'il va bien au-delà.

## 1.7 Définition du périmètre de la thèse

Les différents périmètres d'études retenus au fil des chapitres, sont illustrés au sein de la figure 1.8 ci-dessous. Les chapitres I et II introduisent le contexte de cette thèse et présentent l'état de l'art associé. Les chapitres III, IV, V et VI sont des chapitres de résultats. Ces quatre derniers chapitres répondent aux approches méthodologiques énoncées dans le positionnement de notre recherche.

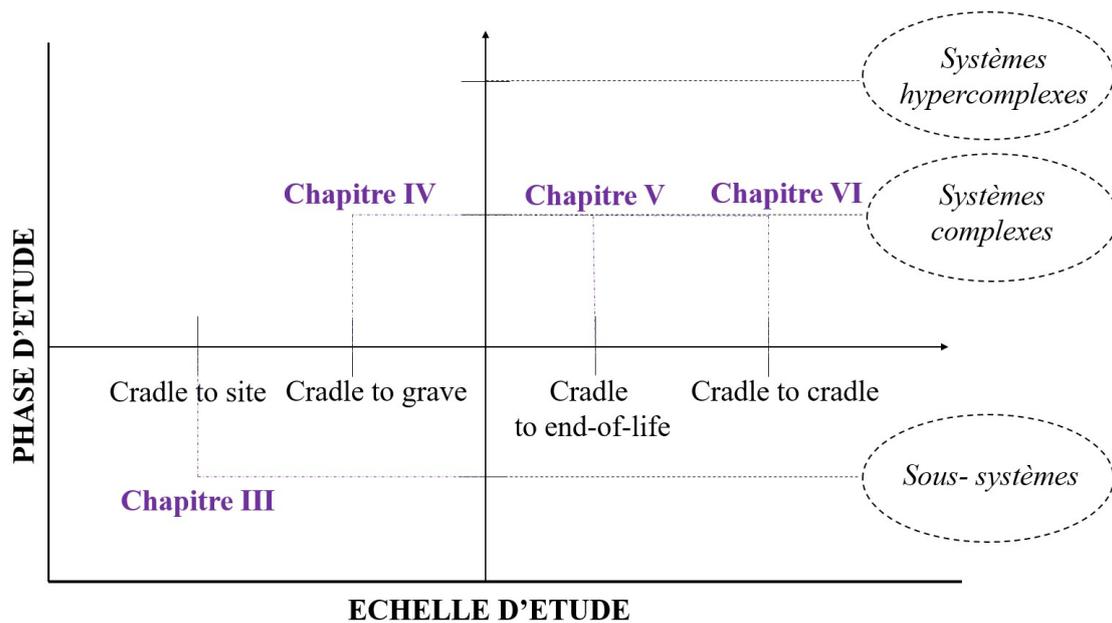


FIGURE 1.8 – Organisation du manuscrit



CHAPITRE 2

# État de l'art

---

## Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Analyse de cycle de vie</b>	<b>23</b>
2.1.1	Définition et application du cadre méthodologique de l'ACV	23
2.1.2	Normalisation de l'ACV	28
2.1.3	Les différents types d'ACV	31
2.1.4	Outils et bases de données existantes	31
2.1.5	Les limites de l'ACV	34
<b>2.2</b>	<b>Approche multiscalaire de la méthodologie de l'ACV</b>	<b>37</b>
2.2.1	ACV à l'échelle des matériaux en phase structurelle : Secteurs du gros oeuvre et second oeuvre	37
2.2.2	ACV à l'échelle des bâtiments : industries de la construction et de l'énergie en phase fonctionnelle	39
2.2.3	ACV à l'échelle des quartiers et villes : évaluation environnementale globale	40
<b>2.3</b>	<b>Conclusion</b>	<b>42</b>

---

**L**E chapitre présent expose l'état de l'art sur la méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie. L'objectif est de définir cette méthodologie, de recenser les travaux associés, de révéler les outils existants, de caractériser les phases, périmètres, limites et normes environnementales. Cet état de l'art s'intéresse à l'application de l'ACV à différentes échelles : des matériaux de construction, produits, des bâtiments, des quartiers et des villes.

## 2.1 Analyse de cycle de vie

### 2.1.1 Définition et application du cadre méthodologique de l'ACV

L'Analyse de Cycle de Vie est une approche systémique qui se concentre sur le traitement des flux entrants et sortants, offrant une méthodologie pour l'évaluation

des impacts environnementaux depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination finale [Klöpffer 2006], comme nous pouvons le voir à la figure 2.1.

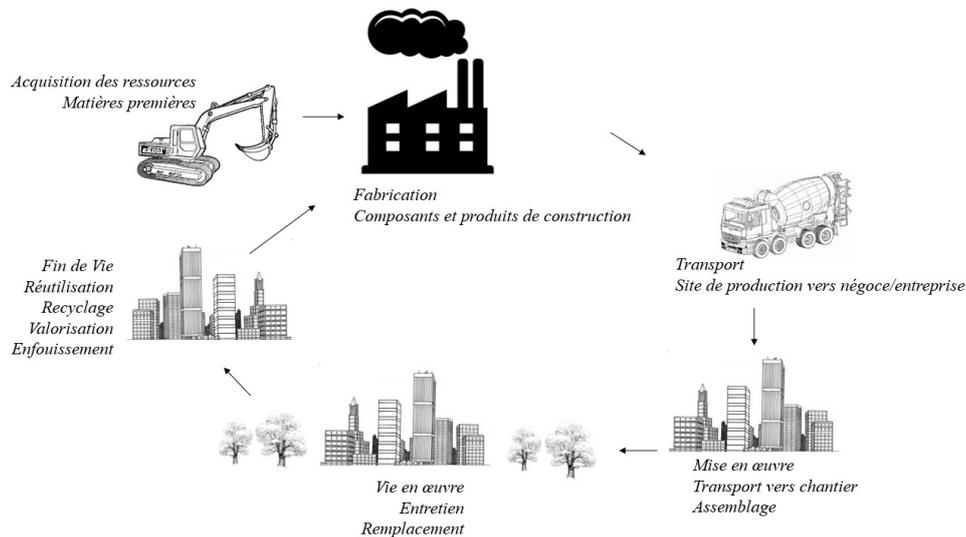


FIGURE 2.1 – Schéma de l'ACV d'un matériau, produit ou système

Dans la littérature, l'ACV est décrite comme étant une méthode quantitative utilisée pour évaluer les charges environnementales de certains produits [Zhang 2014]. Selon Kholer et al., elle permet également d'opérer à un changement de paradigme dans l'évaluation et les choix des produits et services dans les bâtiments [Holger 2010]. En effet, aujourd'hui, les choix ne s'objectivent plus uniquement à l'aulne de problématiques économiques, mais également d'enjeux environnementaux, sociaux, i.e de la durabilité des espaces bâtis et des territoires. Grâce aux principales fonctions de l'ACV, la quantification et l'évaluation de la performance environnementale des produits, processus ou systèmes peuvent permettre d'orienter les choix des acteurs de la transition écologique en leur offrant diverses alternatives selon les contraintes et opportunités que proposent leur système d'étude.

Cette méthodologie adopte une approche globale de l'évaluation environnementale, où l'on s'intéresse de plus en plus à l'intégration des méthodes ACV dans le processus décisionnel de la construction des bâtiments pour la sélection de produits préférables sur le plan environnemental, et aussi pour l'évaluation et l'optimisation des processus de construction [Asdrubali 2013]. Le nombre de publications dans le domaine des études en ACV environnementales a augmenté rapidement depuis la norme ISO 14040. Selon Anand et Amor, le nombre de publications dans Scopus est passé de 88 en 2011 à 264 en 2015 [Anand 2017]. Parmi ces nombreux articles, certains ont abordé la méthodologie de l'ACV dans le contexte du bâtiment :

- [Kamali 2016] Life cycle performance of modular building : a critical review.

- Renew. Sustain. Energy Reviews, 62, 1171-1183;
- [Ding 2014] Life Cycle Assessment in Buildings : An overview of Methodological Approach;
  - [Huang 2017] Energy and carbon performance evaluation for buildings and urban precincts : review and a new modeling concept, Clean. Production;
  - [Soust-Verdaguer 2016a] Simplification on life cycle assessment of single-family houses :a review of recent developments. Build. Environment, 103, 215-227;
  - [Lotteau 2015] Environmental assessment of sustainable neighborhood projects through NEST, a decision support tool for early stage urban planning. Procedia Eng. 115,69-76
  - [Fouquet 2015b] Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings : application to biogenic carbon and global warming assessment
  - [Martínez-Rocamora 2016] LCA databases focused on construction materials : a review. Renew. Sustain. Energy Rev. 58, 565-573

Un second ensemble d'articles ont plutôt révisé la méthodologie dans les travaux analytiques et traité des études de cas :

- [Aktas 2012] Impact of lifetime on U.S residential building LCA results, Int. J. Life Cycle Assess. 17, 337-349;
- [Ramesh 2010] Life cycle energy analysis of buildings : an overview, Energy Build, 1592-1600;
- [Asdrubali 2013] Life cycle analysis in the construction sector : guiding the optimization of conventional Italian buildings;
- [Buyle 2013] Life cycle assessment in construction sector : a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26, 379-388;

- [Roh 2016] Development of a building life cycle carbon emissions assessment program (BEGAS 2.0) for Korea's green building index certification system, *Renew. Sustain. Energy Reviews*, 53, 954-965
- [Cole 1996] Life-cycle energy use in office buildings, *Build. Environ.* 31, 307-317;
- [Sartori 2007] Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings : a review article, *Energy Build.* 39, 249-257;
- [Thormark 2007] Energy and Resources, Material Choice and Recycling Potential in Low Energy Buildings, 2007, pp.1-6;
- [Mitterpach 2016] An environmental impact of a wooden and brick house by the LCA method, *Key Eng. Mater.* 688, 204-209;
- [De Lasso 2016] Case study : LCA methodology Applied to Materials Management in Brazilian Residential Construction site, Hindawi Publishing Corporation.

D'autres travaux se sont concentrés sur différentes études de cycle de vie pour évaluer les impacts environnementaux de la construction des bâtiments [Chau 2015], d'autres encore ont tenté de déterminer les impacts par phase d'ACV et par type de bâtiments [Sharma 2011, Abd Rashid 2015]. Il est notamment répertorié dans la littérature, des études en ACV, concentrées sur les bâtis résidentiels de type « maisons individuelles », dans le but d'évaluer les stratégies de simplification des méthodes [Soust-Verdagner 2016a]. Plusieurs auteurs soulignent aussi dans la littérature, que les études en ACV se concentrent surtout sur l'évaluation des impacts environnementaux des bâtiments, mais très peu sont comparées entre elles [Schlegl 2019, Dong 2015a, Dong 2015b], de par leur périmètre d'étude, leur unité fonctionnelle, leur différente échelle d'analyse.

On note également que très peu d'études en ACV couvrent aujourd'hui des travaux qui portent sur l'impact environnemental dans la construction des bâtiments résidentiels en milieu insulaire, de par leur manque de données adaptées à leur contexte spécifique et situation géographique. Les travaux ci-dessous illustrent les études répertoriées en ACV en territoire insulaire :

- [Dong 2015b] A life cycle assessment model for evaluating the environmental impacts of building construction in Hong Kong. *Build. Environ.* 2013, 89,

183-191;

- [Hoxha 2017] Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability. 2017, 144, 33-47;
- [Morales 2019] Regionalized inventory data in LCA of public housing : A comparison between two conventional typologies in southern Brazil. J. Clean. Prod. 2019, 238, 117869;
- [Abd Rashid 2017] Environmental impact analysis on residential building in Malaysia using life cycle assessment. Sustainability 2017, 9 329;
- [Kamali 2019] Conventional versus modular construction methods : A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. Energy Build. 2019, 204, 104279.
- [Ayagapin 2020] Environmental Overcost of Single Family Houses in Insular Context : A Comparative LCA Study of Reunion Island and France. Sustainability. 2020, 12, 8937.

Plusieurs dizaines d'ouvrages traitent aujourd'hui des méthodes ACV dans l'évaluation des performances des bâtiments, de leur conception et des pratiques de construction. Cette méthodologie, qui a été initialement utilisée pour l'évaluation de l'impact de la performance des produits sur l'environnement, peut aussi s'étendre à l'évaluation de la politique gouvernementale des processus de développement de produits dans d'autres industries [Singh 2011, Buyle 2013]. Selon Sing et al., 2011, un examen de la littérature relative à la construction de bâtiments au cours de quinze dernières années souligne un intérêt croissant pour l'intégration de l'ACV dans la prise de décision en matière de construction. Cependant, ces plusieurs dizaines de travaux sont fragmentés et aucune compilation systématique de cette littérature n'a été entreprise. Ainsi, il présente une revue structurée de la littérature sur l'ACV liée à la construction de bâtiments classée en 4 catégories :

- l'ACV pour la sélection de produit et matériaux de construction;
- l'ACV pour l'évaluation des systèmes/ processus de construction;
- les outils et bases de données d'ACV liées à l'industrie de la construction;
- et les développements méthodologiques de l'ACV liés à la construction;

Dans une ACV, nous pouvons avoir différentes définitions des frontières à considérer, comme nous le montre la figure 2.2. Les études peuvent être regroupées soit :

- en considérant uniquement les étapes d'extraction/ acquisition des matières premières au produit, représentant ici la frontière "cradle-to-gate" ;
- ou en considérant que le produit arrive jusqu'au chantier, en incluant la distribution, représentant la frontière "cradle-to-site" ;
- en considérant le sous-système incluant la phase de maintenance, d'entretien, sans tenir compte de la fin de vie, représentant la frontière "cradle-to-grave" ;
- ou, en considérant toutes les étapes du cycle de vie d'un matériau, produit ou système, allant de l'acquisition des matières premières à la fin de vie du produit, représentant ici la frontière "cradle-to-end-of-life" ;
- et enfin, en considérant une boucle complète allant de l'acquisition des matières premières aux matières secondaires, défini par la frontière du "cradle-to-cradle".

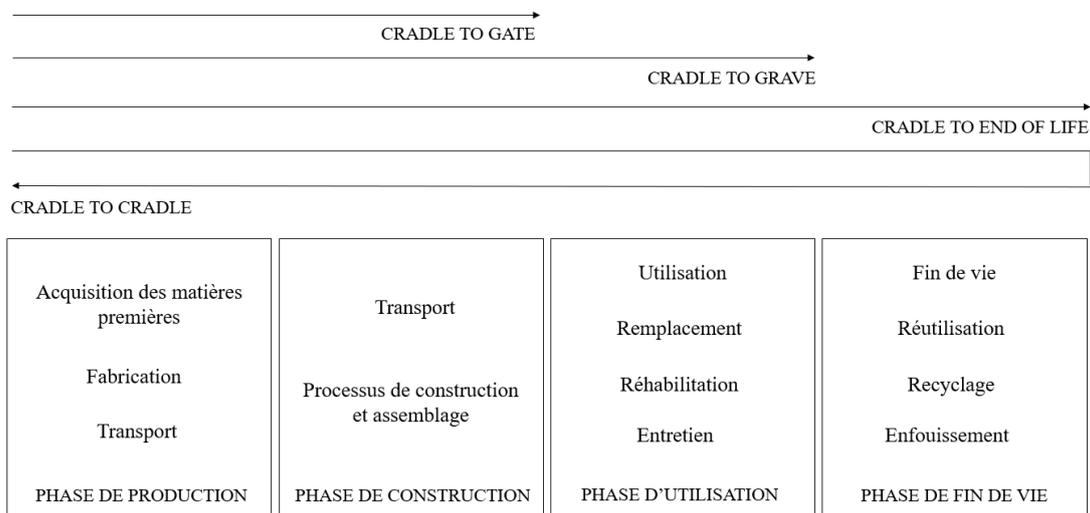


FIGURE 2.2 – Différents périmètres d'études en ACV

Dans ce chapitre, nous abordons les différentes étapes inhérentes à la mise en œuvre de l'ACV, sa normalisation, les différents types d'ACV en fonction des objectifs visés, ainsi que les outils et bases de données existantes pour effectuer une ACV.

### 2.1.2 Normalisation de l'ACV

Au début des années 90, il y a eu une conscientisation de l'impact de l'homme sur l'environnement. L'ACV est ainsi apparu dans le domaine de l'environnement pour diagnostiquer un état des lieux de cette situation environnementale et réfléchir à une planification des actions à mener pour contourner les impacts futurs sur le changement climatique. Elle a attiré par ailleurs l'attention des scientifiques en raison de cette détérioration accélérée de l'environnement [Tillman 2004].

Au fil des années, les organisations environnementales ont fait alors pression pour normaliser la méthodologie et les lignes de conduite de l'ACV au niveau international. Ainsi, la SETAC a alors commencé à façonner une définition de l'ACV et à mettre au point en parallèle une méthodologie normalisée pour les études ACV, ayant conduit à l'élaboration de la série ISO 14040 [Ekvall 2002, Laurance 2008]. Cette méthodologie normalisée est alors apparue pour la première fois par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) dans le cadre de la série ISO 14040 en 1997. Dès lors, cette méthodologie a été révisée en 2006 [ISO 2006], et a permis d'inclure dans le cadre ACV les séries suivantes :

- ISO 14040 - Principes et cadre ;
- ISO 14041 - Objectif et champ de l'étude - définition et analyse des stocks ;
- ISO 14042 - Évaluation de l'impact du cycle de vie ;
- ISO 14043 - Interprétation du cycle de vie ;
- ISO 14044 - Exigences et lignes directrices.

L'adoption de ces normes allant de l'ISO 14040 à 14044 à échelle internationale a permis d'avoir des normes et directives spécifiques plus régionales. Le but étant de faciliter et d'obtenir une analyse plus fine pour une communication plus transparente. Cette adoption a été réalisée dans l'optique de l'amélioration des performances environnementales des bâtiments ainsi que les pratiques durables dans l'industrie de la construction. C'est pourquoi il existe en ACV, quatre phases normalisées : comme nous le montre la figure 2.3. Comme le montre la figure ci-dessous, les flèches indiquent l'interaction existante au sein des phases et entre elles, pour garantir que les objectifs, la portée de l'étude, les méthodes et les résultats soient cohérents, complets et pertinents. Il est à noter que les résultats d'une étude ACV varient en fonction de l'objectif et de la portée de l'étude qui sont définis dès le départ. Cette variation de périmètre et l'objectif de l'étude expliquent la plupart du temps la différence des résultats et la difficulté de les comparer à d'autres études ACV.

La première des quatre étapes de l'ACV comprend la définition des objectifs et du champ de l'étude. C'est ici que se fait la délimitation des systèmes qui sont à étudier, aux fonctions des systèmes, au choix de l'unité fonctionnelle, aux hypothèses, aux catégories d'impacts qui sont pris en compte, comme illustré dans la figure 2.4. La seconde étape est celle de l'inventaire des flux de matières et d'énergies entrants (type matières premières) et sortants (type déchets), ainsi que les flux d'énergie entrants et sortants (type énergie électrique, énergie thermique).

La troisième étape consiste quant à elle à l'évaluation des impacts potentiels à partir des flux recensés : liés aux impacts potentiels en raison de nombreuses incertitudes. Enfin, la quatrième et dernière étape, concerne l'interprétation des résultats obtenus en fonction des objectifs fixés préalablement. L'interprétation se fait tout de même à chaque étape de l'étude dans l'optique de vérification des objectifs, s'ils ont

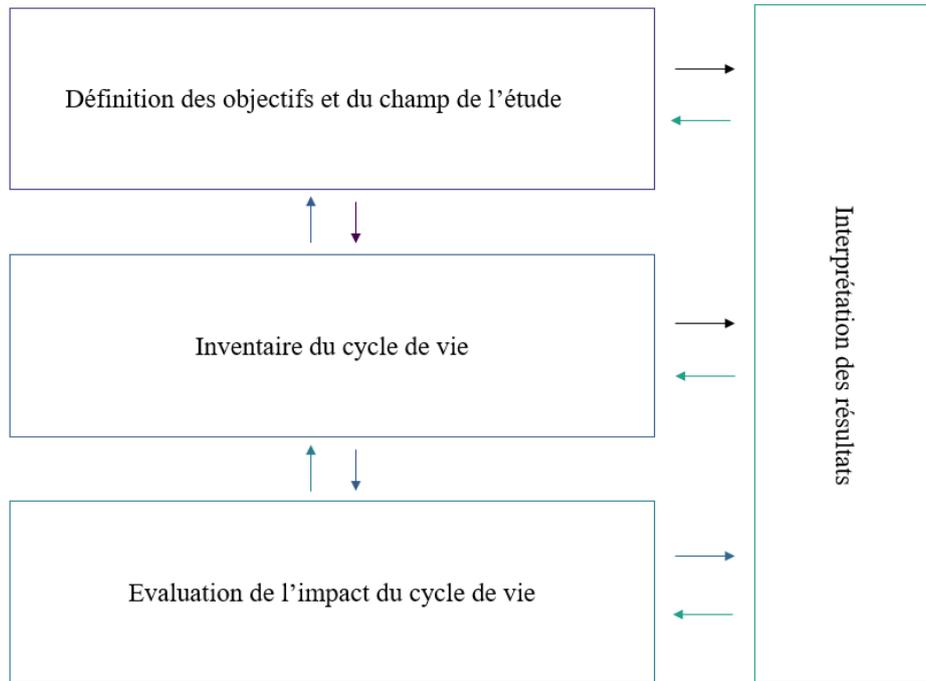


FIGURE 2.3 – Les quatre étapes normalisées de l'ACV

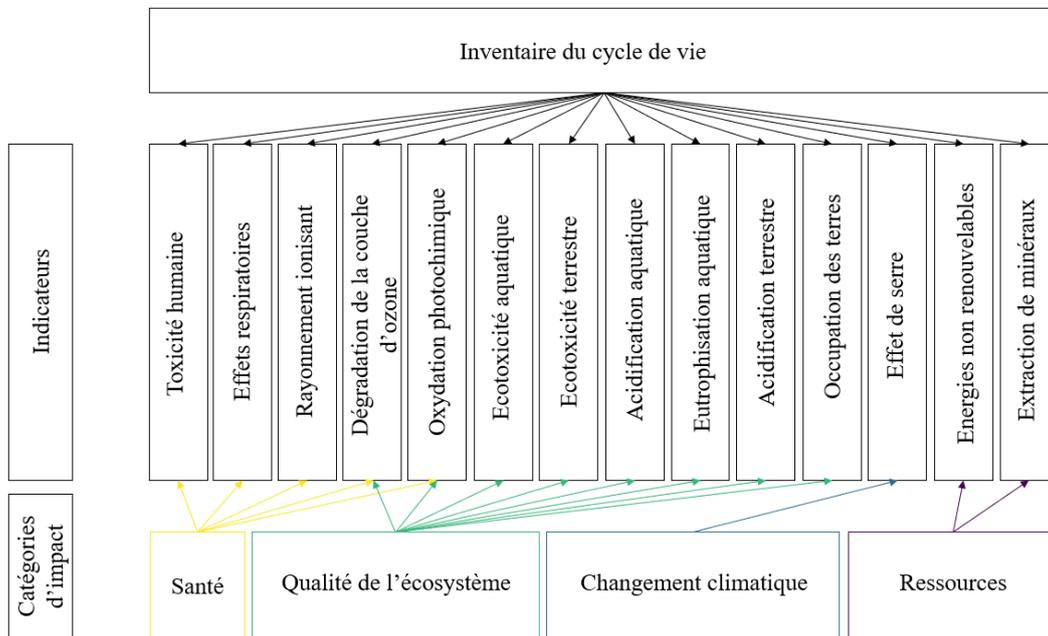


FIGURE 2.4 – Les indicateurs environnementaux et les catégories d'impact

été bien retenus et atteints. Cette dernière étape résume et analyse alors les résultats afin de dresser des conclusions utiles à la prise de décision dans le cadre des objectifs

fixés initialement.

### 2.1.3 Les différents types d'ACV

Il existe deux grandes approches méthodologiques : l'ACV attributionnelle, qui consiste à définir les charges environnementales, les flux entrants et sortants du cycle de vie d'un système. C'est une approche utilisée pour examiner les flux environnementaux à partir du cycle de vie des produits au sein d'un système choisi [Finnveden 2009]. Elle spécifie des informations relatives aux impacts des processus utilisés pour produire et éliminer un produit [Brander 2008]. Ainsi, les résultats d'une ACV d'attribution peuvent être utilisés pour identifier les opportunités de réduction des impacts directs à différentes étapes du cycle de vie des produits.

L'ACV conséquentielle, consiste quant à elle, plutôt à décrire les évolutions et changements des flux, qui sont en relation avec certaines prises de décisions. C'est une approche adaptée à l'analyse des changements au cours d'un cycle de vie [Curran 2005]. L'ACV-C permet ainsi d'identifier et de quantifier les impacts éventuels susceptibles de se produire à la suite d'une décision antérieure [Commission 2010]. Il prend en compte les effets tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du cycle de vie d'un produit. Cette approche se concentre sur la description des effets, i.e des niveaux de sortie du cycle de vie.

Nous noterons que dans la littérature, nous pouvons rencontrer à la fois de l'ACV-A mais aussi de l'ACV-C lors de l'établissement des potentielles charges environnementales de construction d'un bâti ou d'une comparaison de bâtis entre eux.

### 2.1.4 Outils et bases de données existantes

Plusieurs outils existent aujourd'hui pour réaliser l'ACV. Ces derniers permettent d'évaluer l'impact environnemental dans de nombreux champs : industrie, transport, énergie, alimentation, agriculture, etc. Les logiciels les plus utilisés dans la littérature sont répertoriés afin de montrer leur pertinence dans l'application des études en milieu continental et insulaire.

*Nous présentons dans un premier temps les bases de données que nous avons répertoriées. Ces bases sont :*

- **Ecoinvent 2.1** : cette base contient des données d'écobilan, est utilisée pour la réalisation des ACV, des déclarations environnementales de produits EPD, des bilans CO<sub>2</sub>, de la politique intégrée des produits, de la certification environnementale et d'autres applications. Elle contient également des inventaires de cycle de vie pour l'énergie – électricité, pétrole – charbon – biocarburant-

- nucléaire, biogaz, les matériaux – chimiques, métaux matières premières minérales, plastiques, biomasse, matériaux écologiques, le traitement des déchets – incinération, assainissement, les produits et processus agricoles, électronique et l'usinage des métaux et ventilation des bâtiments ;
- **Inies** : cette base de données françaises met à disposition des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de produits de construction, des Profils Environnementaux Produits (PEP) d'Equipements, des données de services – eau, énergie, et des inventaires de cycle de vie des matériaux. Les informations de cette base sont issues de façon volontaire par les fabricants ou syndicats professionnels sur la base d'une ACV conforme aux exigences réglementaires françaises et européennes en vigueur ;
  - **Ademe** : la base de données « Base carbone » est une base de données publiques de facteurs d'émissions ;
  - **GaBi databases** : cette base de données « GaBi » est basée sur une large collecte de données primaires auprès d'entreprises, associations et organismes publics. Ces ensembles de données sont élaborées à partir d'une base de données sous-jacente comprenant au moins le même nombre d'ensemble de données de processus unitaires. GaBi couvre la plupart des industries y compris l'agriculture, le bâtiment et la construction, les produits chimiques et matériaux, les biens de consommation.

*Puis nous présentons quelques logiciels utilisés dans le monde, aussi bien dans les milieux continentaux qu'insulaires :*

- **Equer** : ce logiciel effectue l'ACV des bâtiments et établit ainsi leur impact. Ce modèle importé de Comfie est complété par des données sur les déchets, l'eau, la consommation, les trajets quotidiens ;
- **Ariadne** : cet outil vient compléter les logiciels précédemment décrit. Il opère à l'échelle du quartier ;
- **Elodie** : cet outil calcule l'impact environnemental d'un bâtiment. Il quantifie les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment ;
- **Gabi** : ce logiciel permet de modéliser et tracer le cycle de vie des bâtiments. Il est capable notamment de modéliser le cycle de vie de plus d'un millier de procédés industriels différents, et peut développer des ACV ;
- **Bees** : ce logiciel propose une assistance dans le choix des produits de construction. C'est un outil de mesure de différentes performances, capable de mesurer la performance environnementale de la production des bâtiments selon l'approche ACV ;

- **Simapro** : permet la modélisation avec calcul d’incertitude. Il analyse les résultats, compare les produits entre eux, modélise et analyse les performances environnementales ;
- **Open LCA** : ce logiciel identifie les facteurs clés tout au long du cycle de vie par catégorie de processus, flux ou impact ;
- **Lesosai** : ce logiciel est un logiciel de certification capable de réaliser des évaluations écologiques et énergétiques des bâtiments. Il considère les certifications et labels énergétiques (RT 2012 ; RT 2005, RT Rénovation) ;
- **Gemis 4.5** : cet outil intègre les flux d’énergie et de matériaux, le transport et propose une base de données conséquente pour les systèmes. C’est un outil d’évaluation, libre et gratuit, intégrant près de 10 000 processus et produits. Cet outil a été développé en 1989 par l’Oko-Institut, et distribué sur la plateforme de l’Institut Internationale pour l’analyse et la stratégie de durabilité (IINAS) [Fritsche 1998]. Un autre avantage de ce logiciel, est qu’il est gratuit, et intègre plus de 10 000 processus et produits. Ces processus inclus dans ce logiciel se réfèrent à différents pays du monde. Mais la particularité de cet estimateur réside aussi dans les processus dits « génériques », qui peuvent être utilisés comme des processus de base, non assignés à un pays particulier, et qui peuvent ainsi être adaptés à un territoire en fonction des spécificités de la région étudiée. La figure 2.5 illustre le concept général de l’outil sur lequel nous sommes basés dans le cadre de nos travaux. L’un des avantages de ce logiciel est qu’il intègre les flux d’énergie et de matières, le transport, et une base de données conséquente pour la définition des facteurs d’émission des produits.

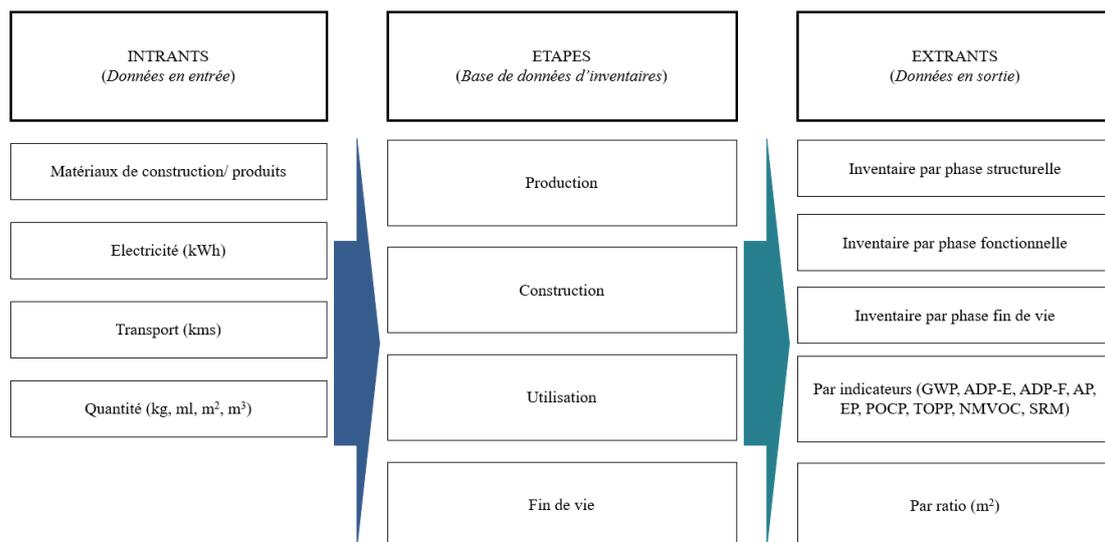


FIGURE 2.5 – Concept général de l’outil

Ce logiciel qui est celui que nous avons retenu pour la définition de nos facteurs d'émission est davantage décrit dans le Chapitre III.

Nous constatons qu'il existe aujourd'hui de nombreuses bases de données et aussi de nombreux outils pour quantifier l'impact environnemental de nombreux secteurs, produits ou processus. Cependant, la majorité des bases de données et outils ne sont pas gratuits et ne disposent pas forcément de possibilité d'adaptation des données face aux territoires ayant des particularités. Malgré son difficile accès en termes d'ergonomie, nous avons choisi de travailler avec GEMIS, car ce dernier met à disposition des utilisateurs des données génériques modifiables sur plus de 10 000 processus.

### 2.1.5 Les limites de l'ACV

Le développement méthodologique de l'ACV a été important au cours de ces dernières décennies. Cependant, plusieurs limites ont été mentionnées dans les examens critiques de la littérature. L'un des problèmes méthodologiques classiques de l'ACV est celui de « l'allocation ». Cette dernière dépend du choix de la méthodologie : l'ACV-A (attributionnelle) ou l'ACV-C (conséquentielle). Les études issues de l'ACV-A allouent une responsabilité environnementale au cycle de vie d'un produit étudié (impact d'un bâti), et l'ACV-C se focalise sur les conséquences environnementales d'une décision (décision de construire un bâti). En fonction de ces choix, les allocations qui sont à considérer pour le système ne sont pas les mêmes. C'est pourquoi l'allocation peut être définie comme étant la répartition des charges environnementales et des autres flux de matières et d'énergie entrant et sortant d'une activité technologique entre les produits pour lesquels elle est utilisée [Russell 2005], comme nous l'avons décrit dans la section 2.1.3.

Dans cette section dédiée aux limites de l'ACV, nous soulignons l'importance des résultats qui diffèrent les uns des autres. Ces différences peuvent s'expliquer en partie par divers choix méthodologiques [Ekvall 1999], mais aussi en fonction des critères choisis telle que l'échelle de l'étude. Ces analyses peuvent aller de l'ACV des matériaux de construction à l'ACV de l'ensemble du processus de construction en passant par la combinaison de composants [Buyle 2012, Cabeza 2014, Karimpour 2014].

Le contexte géographique et réglementaire entourant la construction des bâtiments est relativement hétérogène en fonction des cas d'études. C'est pourquoi, construire en milieu tropical mobilise d'autres enjeux, que ce de régions tempérées ou désertiques. A cet égard, les choix des matériaux, les points d'approvisionnement, les modalités de mise en œuvre ajoutent de la complexité dans une volonté de comparaison des études. Cependant, des tendances peuvent être tout de même identifiées, telles que la prédominance de la phase d'utilisation, la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement, l'augmentation de la part et de la valeur absolue de l'énergie intrinsèque pour les bâtiments à faible consommation d'énergie [Kellenberger 2012].

Nous retenons dans cette partie que de nombreuses initiatives sont encore en cours pour l'harmonisation de la méthodologie de l'ACV. Nous soulignons également que parmi la multitude de méthodes d'évaluation environnementale disponibles – bilans énergétiques, empreinte carbone, analyse de risque, l'ACV se présente comme l'une des rares méthodes d'évaluation capable de quantifier un panel d'indicateurs environnementaux sur l'ensemble de cycle de vie d'un système [Risch 2012]. L'ACV ne s'arrête donc pas qu'au bilan carbone. L'une des capacités de l'ACV est également d'expliquer le transfert de la pollution d'une catégorie d'impact à une autre ou d'une étape de cycle de vie à une autre – transfert dans le temps et l'espace [Guérin-Schneider 2017].

Parmi tous les outils disponibles dans le contexte de l'évaluation environnementale, l'ACV est considérée comme l'outil le plus efficace pour la quantification et l'évaluation d'un système ou sous-système. L'ACV peut être comparée à différentes évaluations environnementales existantes aujourd'hui :

#### **L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE :**

- évalue l'impact d'un grand nombre de polluants et pour de nombreux effets ;
- se situe au niveau mondial, du berceau à la tombe, tandis qu'une évaluation des incidences sur l'environnement effectue son analyse pour un site spécifique, sans tenir compte de l'ensemble du cycle de vie ;
- présente plusieurs points communs avec l'analyse des risques, notamment l'évaluation de la toxicité pour l'homme et la biodiversité ;
- peut estimer la contribution potentielle moyenne d'un produit à certains impacts environnementaux ;
- l'ACV et l'analyse des flux de matières (AFM) ont pour point commun d'être basées sur des bilans de masse. Alors que l'AFM tient compte des flux de matières dans une région, l'ACV évalue les flux de matière par processus unitaire. L'ACV calcule par unité fonctionnelle, les émissions et extractions liées à ces flux de matières ;
- et, nous noterons également que l'empreinte carbone est la composante de l'ACV : en effet, l'empreinte carbone traite du changement climatique. Elle est limitée à l'effet de serre, tandis que l'ACV permet d'étudier d'autres catégories d'impacts ;

#### **LES AUTRES OUTILS D'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE :**

- *l'analyse des flux de substances* quantifie les flux et l'accumulation dans l'environnement d'une substance ou d'un groupe de substances ;

- *l'évaluation des incidences sur l'environnement* se réfère aux installations individuelles à construire et analyse l'impact environnemental d'un projet proposé à un endroit spécifique ;
- *l'analyse des risques* permet d'évaluer si les concentrations dans l'environnement sont inférieures aux concentrations sans effet, considérées comme sûres ;
- *l'analyse des flux matières* quant à elle, tient compte des flux de matières qui se produisent dans le système économique d'une région donnée. Ces matières peuvent être des matières premières telles que le verre, le papier, le béton, le plastique ou les composés techniques ;
- *l'empreinte carbone*, détermine principalement les émissions directes ou indirectes de GES d'un produit, d'une activité humaine ou d'une entreprise.

L'usage de l'analyse d'incertitude sur les études en ACV, qui n'est cependant pas encore une pratique « automatique ». Pour cela, une analyse correcte est facilitée à condition de connaître clairement quels types d'incertitudes existent dans les ACV et quels outils sont disponibles pour les traiter. Par conséquent, il existe un cadre qui est développé pour classer les types d'incertitude dans les ACV. L'incertitude est alors divisée soit en incertitude des paramètres, soit en incertitude du modèle ou soit en incertitude due aux choix. Ainsi, l'analyse d'incertitude permet d'affiner la précision de certains résultats.

Parmi les travaux traitant des incertitudes, l'étude de Endrit Hoxha et al., a été basée sur les incertitudes liées à la quantité de matériaux utilisés dans la phase de production et de maintenance du bâtiment, à la distance de transport, et les incertitudes liées à la consommation d'énergie pour le chauffage et la ventilation, l'ECS<sup>1</sup>, la cuisson et l'éclairage ont été considérés [Hoxha 2017]. Les résultats ont montré que les impacts des matériaux de construction ont été identifiés comme les plus grands contributeurs à l'indicateur de déchets et ont contribué de manière égale à la phase d'exploitation à l'indicateur de potentiel de réchauffement global. Ainsi, si l'on considère les incertitudes relatives aux impacts des matériaux de construction, l'incertitude du calcul de l'ACV n'est que légèrement inférieure à la variabilité entre les projets de construction actuels.

L'analyse statistique des données sur la durée de vie des bâtiments résidentiels américains indique que la durée de vie moyenne des bâtiments est de 61 ans. Cette étude souligne le fait que l'inclusion d'informations précises sur la durée de vie dans l'ACV permet de mieux comprendre les impacts du cycle de vie, et d'améliorer la précision des études ACV.

Dans la littérature, d'autres travaux ont porté sur les méthodes de propagation des incertitudes dans l'analyse de cycle de vie des bâtiments [Lu 2013, Groen 2014, Shen 2012]. Les auteurs Leung et al., ont révélé que la majorité des articles examinés visaient plutôt à développer des méthodes pour une meilleure modélisation et

---

1. Eau Chaude Sanitaire

prédiction des incertitudes [Leung 2015]. Endrit Hoxha et al., montrent plutôt dans leur étude l'importance d'identifier les incertitudes des matériaux de construction à échelle d'un bâtiment, ce qui permettrait finalement d'identifier le matériau de construction ayant la plus grande contribution relative à l'incertitude des impacts globaux d'un bâtiment [Hoxha 2017].

En synthèse, nous noterons que dans la littérature il existe de nombreuses études permettant de souligner et considérer les limites de l'ACV. Les limites peuvent apparaître lors de l'évaluation des différentes phases de cycle de vie des bâtiments, en fonction des périmètres d'étude (structurelle/ fonctionnelle et/ou fin de vie), mais aussi au niveau des choix des indicateurs, ou encore des milieux évalués.

## 2.2 Approche multiscalaire de la méthodologie de l'ACV

### 2.2.1 ACV à l'échelle des matériaux en phase structurelle : Secteurs du gros oeuvre et second oeuvre

Le secteur du bâtiment est l'une des activités les moins durables de la planète. Il représente à lui seul pas moins de 35% de la demande totale d'énergie, et génère près de 40% des émissions mondiales de gaz à effet de serre figure 2.6. Depuis plusieurs années déjà, l'éveil d'une sensibilité écologique, la conscientisation de l'aspect fini des ressources, nous invite à une totale refonte de nos pratiques, modes d'habiter, méthode de construction etc. Ainsi, de nouvelles stratégies telles que les approches citées ci-dessus, sont de plus en plus présents dans la littérature [Asdrubali 2013].

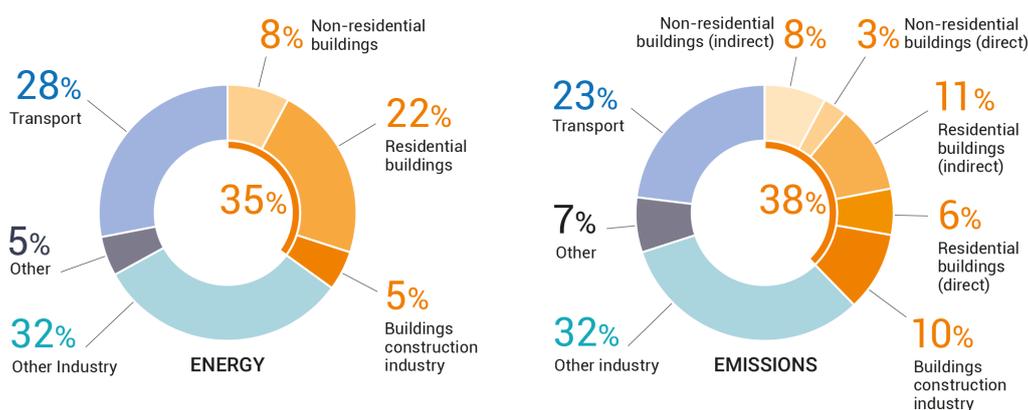


FIGURE 2.6 – Part de la consommation et des émissions mondiales de GES dans le secteur du bâtiment - Global Status Report for Buildings and Construction

Les études en ACV peuvent porter sur les différents types matériaux utilisés dans le secteur de la construction, tels que le béton, l'isolant, le bois et autres matériaux de construction. Parmi ces études, Noelia Llantoy et al., ont effectué une analyse comparative du cycle de vie de différents matériaux d'isolation -type polyuréthane, polystyrène extrudé, laine minérale dans l'optique de considérer le profil environnemental de chaque type de matériau d'isolation dans le climat tempéré. Ces auteurs ont montré que l'impact environnemental le plus élevé est associé au polystyrène et que la meilleure performance environnementale est celle de la laine minérale. Cette étude a permis de donner un nouvel aperçu concernant l'impact des différents matériaux d'isolation dans le bâtiment [Llantoy 2020].

L'étude de cas de Contarini et Meijer, (2015) compare plusieurs systèmes de toits plats, de différents matériaux et épaisseurs d'isolants, de résistance à la chaleur, de couche d'imperméabilisation et de couches de revêtement pour un immeuble d'appartements aux Pays-Bas [Contarini 2015]. Les résultats ont montré que l'amélioration de l'isolation de 2,5 à 5 m<sup>2</sup> K/W entraîne une réduction des scores de dommages d'environ 10 à 40%.

Puettmann et al., (2010), ont également proposé une comparaison, mais cette fois-ci entre la fabrication de bois feuillus et de bois résineux aux Etats-Unis. Le résultat a montré que le résineux nécessitait 50% moins d'énergie que le bois dur [Puettmann 2010].

Kahhat et al, (2009), ont fondé dans leur étude, le cadre de l'ACV pour analyser les impacts environnementaux de six systèmes de murs extérieurs différents d'un bâtiment résidentiel à un étage. Les résultats de l'étude ont indiqué que la phase d'exploitation du cycle de vie représente environ 94% de la consommation totale d'énergie [Kahhat 2009]. En outre, les murs extérieurs en béton isolés consomment environ 700 GJ (5% de l'énergie totale du cycle de vie) par rapport aux murs extérieurs traditionnels à ossature bois et ont un impact moins négatif sur l'environnement en raison de la prédominance de la phase d'utilisation dans la consommation d'énergie.

Dans les travaux de Guggemos et Horvath, (2006), une analyse des impacts environnementaux de la construction de la « structure » d'un bâtiment universitaire en Californie a été effectuée. Les résultats de cette étude des matériaux ont révélé que 50% des impacts environnementaux sont liés à l'utilisation des équipements sur site et que les matériaux de construction temporaires constituent le deuxième impact le plus important [Guggemos 2006]. Toutes ces études portant sur l'ACV à échelle des matériaux de construction et produits, démontrent l'importance de leur sélection en phase de conception de la construction des bâtis. L'importance du choix de ces derniers en phase de conception permet en partie d'éviter grandement des impacts environnementaux par la suite.

### 2.2.2 ACV à l'échelle des bâtiments : industries de la construction et de l'énergie en phase fonctionnelle

Le secteur du bâtiment est identifié à l'échelle européenne et nationale comme étant un secteur clé dans le cadre de la transition énergétique. Ce dernier a une capacité importante de réduction des consommations énergétiques et est devenu un élément central de réduction des émissions de GES [Sartori 2021].

Comme le souligne Rashid et Yusoff, (2015), les études en ACV pour les bâtiments ont progressé au cours de ces dernières années, et ces derniers ont connu une forte augmentation dans l'industrie de la construction depuis les années 1990 [Abd Rashid 2015].

Dans une autre étude réalisée par Anand et Amor, (2017), il est indiqué que les études d'ACV ont plus que doublé au cours des cinq dernières années, environ 250 documents d'ACV sur la construction ont été publiés [Anand 2017].

Selon la littérature, Zeng et Chini ont constaté aussi que le nombre annuel de publications consacrées aux bâtiments et à l'énergie intrinsèque qui est la quantité d'énergie consommée lors du cycle de vie d'un matériau ou produit, est passé de 4 en 2005 à 76 en 2015 [Zeng 2017]. Dans leur revue, Roberts et al ont eux, comptabilisé 274 articles qui ont été publiés jusqu'à fin 2019. Parmi ces 274 articles, 108 ont été soumis à un examen de post-sélection détaillé. Cet examen a permis de mettre en évidence que l'ACV est généralement utilisée trop tardivement dans les processus.

Aujourd'hui, la demande énergétique des bâtiments représente environ 31% de la demande énergétique finale mondiale et 23% des émissions mondiales de carbone – étant liées à l'énergie [Beck 2018]. L'application de l'ACV à l'environnement bâti, s'est alors considérablement développée au cours de ces 15 à 20 dernières années, et ce, suite à l'apparition et à la publication de la norme ISO 14040, et plus récemment, de la norme EN 15978, décrivant la méthodologie de l'ACV pour les bâtiments [Anand 2017, ISO 1997, CEN 2011, Roberts 2020]. L'ACV est aujourd'hui utilisée dans plusieurs domaines également, y compris dans le bâtiment [Anand 2017] et dans la rénovation des bâtiments [Vilches 2017].

Auparavant, le développement de la durabilité des bâtiments se concentrait principalement sur la demande énergétique mais aussi sur les émissions pendant la phase d'utilisation [Geraldini 2020, Hashempour 2020]. Cependant, depuis l'émergence des bâtiments à faible consommation d'énergie, de nombreuses études ont montré l'importance de l'énergie intrinsèque ainsi que des émissions lors de la phase de construction des bâtiments [Sartori 2007].

Anand et Amor, affirment à travers leurs travaux que les études d'ACV pour les bâtiments sont maintenant passées d'une phase de concentration à une étude de cycle de vie complet [Anand 2017]. En effet, l'ACV est utilisée dans la littérature, surtout pour déterminer les impacts par phase et par type de bâtiment [Sharma 2011, Abd Rashid 2015], pour évaluer également les stratégies de simplifi-

cation des méthodes [Soust-Verdaguer 2016a], mais aussi pour évaluer les impacts environnementaux des bâtiments [Schlegl 2019, Dong 2015a, Dong 2015b].

L'ACV est également utilisée dans les études pour évaluer l'impact des facteurs environnementaux liés à la consommation énergétique des bâtiments [Nwodo 2019]. De facto, l'ACV tend à être une méthode « pratique » pour évaluer l'évolution de la qualité environnementale d'un système ou d'un territoire. A cet égard, les secteurs du bâtiment et de l'énergie se prêtent ainsi à l'évaluation environnementale, qui permet de détecter les problèmes de qualité de l'air et de l'eau, et de détecter les liens de causalité entre les deux secteurs.

### 2.2.3 ACV à l'échelle des quartiers et villes : évaluation environnementale globale

D'ici 2050, 68% de la population mondiale devrait résider dans des régions urbaines, contre 66,61% en 2021. En outre, 2007 a été la première année où le nombre de personnes résidant dans les régions urbaines a dépassé celui des zones rurales. En 1950, 30% de la population mondiale résidait dans des zones urbaines, [Dataworldbank 2022]. Cette croissance urbaine, faute d'être maîtrisée, pourrait être à l'origine de catastrophes, de dysfonctionnements ou encore de crises considérables tant sur le plan social qu'environnemental. Les villes consomment des ressources et produisent des déchets en quantités très importantes. A l'heure actuelle, elles sont responsables de 75% de la consommation d'énergie et des émissions de GES dans le monde [Doda 2016]. C'est pourquoi, la transformation en une économie à faible émission de carbone offre une importante opportunité de changements dans les villes et leur consommation d'énergie [Rode 2011]. Dans cette perspective, les pays membres de l'Union Européenne, s'inscrivent d'ores et déjà dans une démarche visant la neutralité carbone d'ici 2050. Au fil des années, l'échelle des quartiers et ville est de plus en plus considérée. Ces échelles prennent en compte les données liées :

- aux réseaux - rendements de réseau d'eau, réseau de chaleur, canalisation d'eau potable et eaux usées ;
- aux transports - présence de piste cyclable, distance de transport en commun ;
- et aussi aux déchets - distance à une décharge, des usines de recyclage ;
- les modes d'habiter.

La conception à échelle d'un quartier par rapport à celui d'un bâtiment passe par l'organisation du plan de masse, permettant de travailler sur la compacité et l'exposition des bâtiments mais aussi sur la mutualisation de certains équipements - réseau de chaleur, silo de stationnement, services etc. Il existe un intérêt croissant d'évaluation environnementale à échelle des quartiers et villes car ce sont des échelles opérationnelles typiques pour les projets de développement urbain et elles intègrent ainsi

des clés pour la réussite d'une durabilité urbaine telle que la conception bioclimatique, la mutualisation des équipements, la densité urbaine ou encore les problèmes de mobilité. Ainsi, le quartier est une échelle légitime pour l'expérimentation non pas d'un bâtiment durable mais plutôt d'un urbanisme durable à travers l'implication des habitants.

Dans la littérature, Oliver et al. soulignent que les considérations environnementales et énergétiques qui se focalisent principalement à échelle des bâtiments, soient appliquées de plus en plus à la planification à échelle des quartiers [Oliver-Solà 2011]. En effet, la ville de part son métabolisme est le siège de nombreux flux matières et énergie. Elle exerce de fait sur l'environnement une très forte pression. Cette approche de la vie d'un territoire est aujourd'hui de plus en plus étudié. Toutefois, la complexité de la constitution d'une base d'information suffisante et fiable, rend la tâche laborieuse avant d'aboutir à un corpus consistant permettant une analyse de qualité.

A titre d'exemple, la maîtrise de la demande énergétique lors des projets d'aménagement urbains suppose non seulement la diminution de la consommation énergétique des bâtiments et le choix des matériaux plus écologiques mais passe également par un changement majeur des comportements des habitants et usagers, face aux équipements urbains. L'échelle de la ville est un véritable processus d'agrégation des données permettant des approches transdisciplinaires et analyses multi scalaires.

Il existe aujourd'hui plusieurs outils pour l'évaluation environnementale à échelle des quartiers et villes cf. Tableau 2.1. Ces outils ont été développés dans le but d'évaluer les stratégies de maîtrise des consommations énergétiques, telle que la gestion dynamique de la courbe des charges i.e effacement, déplacement, ou encore à la modification des caractéristiques des bâtiments ou des systèmes énergétiques i.e rénovation.

TABLE 2.1 – Outils d'évaluation environnementale à échelle des quartiers et villes

Outils	Auteurs	Année
EnviBatE	[Gros 2016]	2016
DIMOSIM	[Perez 2015]	2015
SMART-E	[Berthou 2015]	2015

Selon Garcia-Pérez et al., des études utilisant l'ACV à d'autres stades du cycle de vie n'existent pas à ce jour ; il serait notamment utile de procéder à une analyse économique des systèmes de construction choisis et de comparer les résultats à échelle urbaine. Il serait également envisageable de comprendre le concept plus large de durabilité en envisageant une perspective globale (environnementale, économique et sociale) [Perez 2018].

D'autres études peuvent également être réalisées à l'échelle des quartiers et ville, concernant l'évaluation des scénarios de modernisation, en recoupant les données obtenues avec des données d'autres études relatives à la vulnérabilité urbaine, ou encore à la pauvreté énergétique ou à d'autres indicateurs environnementaux.

A travers cette thèse, nous mettons en évidence les études relatives à l'ACV à différentes échelles. Ainsi, après chacune des synthèses bibliographiques, l'importance de l'utilisation de l'ACV à différentes échelles et à différentes phases est soulignée et mis en avant afin de comprendre que l'ACV est une approche multiscalaire fiable et nécessaire dans le cadre des évaluations environnementales globales.

## 2.3 Conclusion

Ce second chapitre a proposé de manière synthétique l'état de l'art portant sur la méthodologie et les travaux en ACV, à différentes échelles et dans différents contextes (continentaux et tropicaux). Cette partie a permis de mettre en évidence l'intérêt porté sur l'utilisation de l'ACV dans l'ensemble du cycle de vie des bâtiments, en tenant compte des différentes catégories d'impacts lors des évaluations environnementales, ainsi que de la prise en compte des paramètres d'incertitudes dans les études en ACV bâtiment. Enfin, les limites de l'ACV et les travaux effectués à la Réunion ont également été abordés dans ce chapitre. Ainsi, à l'issue de cet état de l'art, nous avons vu l'importance du questionnement des échelles, des unités fonctionnelles, des périmètres d'études, des contextes géographiques.

# Conception d'un outil d'évaluation des impacts environnementaux

---

## Sommaire

---

<b>3.1 Application de l'ACV des flux matières . . . . .</b>	<b>44</b>
3.1.1 Présentation de la méthodologie du corpus de l'étude . . . . .	44
3.1.2 Procédure de constitution de la base de données régionalisée	44
3.1.3 Évaluation de la qualité environnementale des bâtiments à la Réunion . . . . .	51
3.1.4 Résultats . . . . .	56
3.1.5 Ambitions locales pour le secteur de la construction et implications politiques . . . . .	62
3.1.6 La place du bois à travers les ambitions de la neutralité carbone à l'horizon 2050 . . . . .	64
3.1.7 Étude comparative de la construction d'un bâti en bois et d'un bâti en béton . . . . .	75
3.1.8 Conclusion . . . . .	77

---

**D**ANS ce premier chapitre de résultat, nous sommes venus appliquer l'ACV à échelle structurelle des maisons individuelles, en tenant compte des phases de production et de construction, ayant pour périmètre d'étude le « Cradle-to-site ». A travers ce chapitre, nous mettons en évidence le surcoût environnemental qui existe dans la construction des bâtis à la Réunion, par rapport à la France métropolitaine. L'effet d'insularité est mis en avant, et des solutions et implications politiques à l'échelle du territoire sont discutées à la fin de ce chapitre.

## 3.1 Application de l'ACV des flux matières

### 3.1.1 Présentation de la méthodologie du corpus de l'étude

Au cours de ces travaux, nous avons été amenés à répertorier un échantillon de maisons individuelles (MI) et d'immeubles de logement (IMM) pour étudier et évaluer la qualité environnementale des bâtis à La Réunion. Pour cela, nous avons commencé par sélectionner les MI et IMM à partir d'un recensement que nous avons effectué auprès des professionnels de construction de l'île. Ces bâtis sont construits dans les différentes zones climatiques de l'île. Nous nous sommes basés principalement sur deux critères : la construction récente des bâtis (moins de douze ans) et les bâtis les plus construits à la Réunion. Ces bâtis respectent les normes européennes et réglementations locales de construction (RTAADOM). Les bâtis étudiés dans ces travaux sont d'ordre résidentiel et non commercial ou industriel. Nous avons recensé au départ une vingtaine de MI. Au fil des années, notre échantillon total s'est étendu à trente quatre maisons individuelles et à dix immeubles de logement 3.1. Les voiries /réseaux divers, et les aménagements extérieurs n'ont pas été considérés lors de l'évaluation environnementale de ces bâtis.

### 3.1.2 Procédure de constitution de la base de données régionalisée

Dans le cadre de ces travaux de thèse, la création et la mise en place d'une base de données régionale a été nécessaire. Cette base de données répertorie les matériaux de construction et produits utilisés dans le cadre de la construction des bâtis à La Réunion. Les facteurs d'émissions des matériaux et produits ont été évalués en tenant compte de notre situation géographique et des conditions insulaires de notre territoire 3.2.

#### 3.1.2.1 Données d'extractions

Les données d'extraction ou d'acquisition des matières premières ont été effectuées à travers différents pays dans le monde entier. L'importation des matières premières pour la construction à la Réunion provient de divers pays. L'obtention des émissions liées aux matériaux et produits à chaque étape et à chaque processus passe par cette étape d'acquisition. La figure 3.3 illustre un exemple de chaîne de processus d'un matériau ou produit ayant été utilisé dans le cadre de la construction d'un bâti à La Réunion. Sur la chaîne de processus, nous distinguons à travers la partie pointillée l'étape d'extraction des matières premières. C'est ce qu'on appelle la phase de production. Ce processus est intégré dans notre base de données.

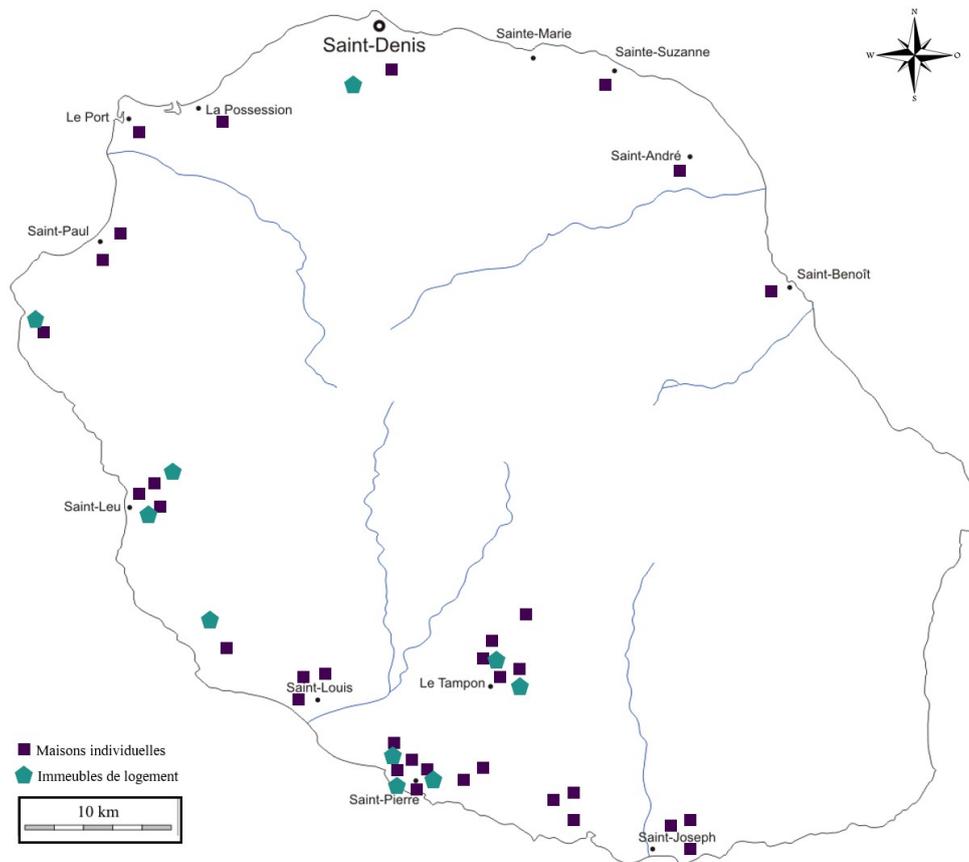


FIGURE 3.1 – Localisation des MI et IMM étudiés et évalués dans ces travaux de thèse

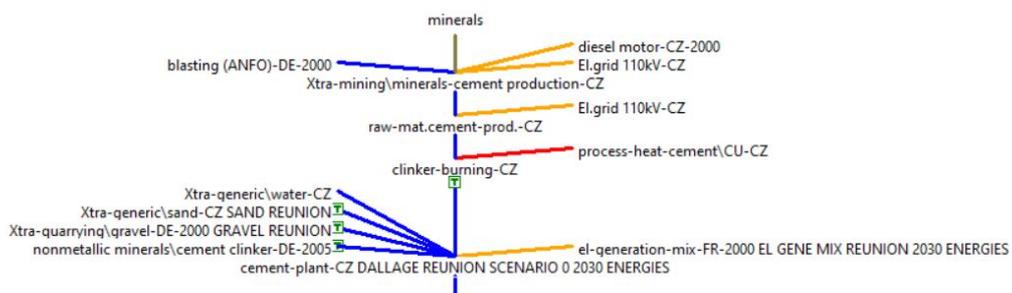


FIGURE 3.2 – Exemple de processus spécifique aux territoires insulaires - Cas de la Réunion

La seconde partie de la chaîne de processus, correspond à la phase de construction, ou la prise en compte de l'assemblage du produit est effectuée sur l'île avant sa mise en œuvre sur le chantier, comme nous pouvons le voir à travers la figure 3.4.

De fait, l'utilisation du mix électrique réunionnais est intégré dans chacun des processus, exceptés pour les produits finis, qui sont directement stockés et prêts à être

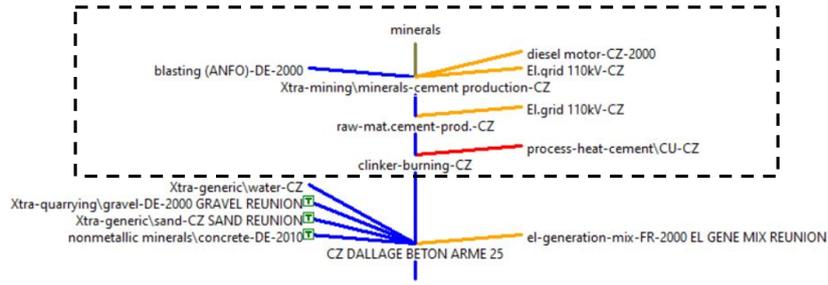


FIGURE 3.3 – Chaîne de processus d'un matériau de construction à partir de GEMIS

distribuer sur l'ensemble de l'île. Les facteurs d'émissions (FE) de chaque matériau ou produit sont ainsi calculés en fonction des impacts en phases de production et de construction. La formulation retenue pour le  $FE_i$  est définie selon l'équation 3.1 :

$$FE_i = Imp_{p,i} + Imp_{c,i} \quad (3.1)$$

Où,

$FE_i$  est le facteur d'émission du produit  $i$

$Imp_{p,i}$  est le facteur d'émission du produit en phase de production

$Imp_{c,i}$  est le facteur d'émission du produit en phase construction.

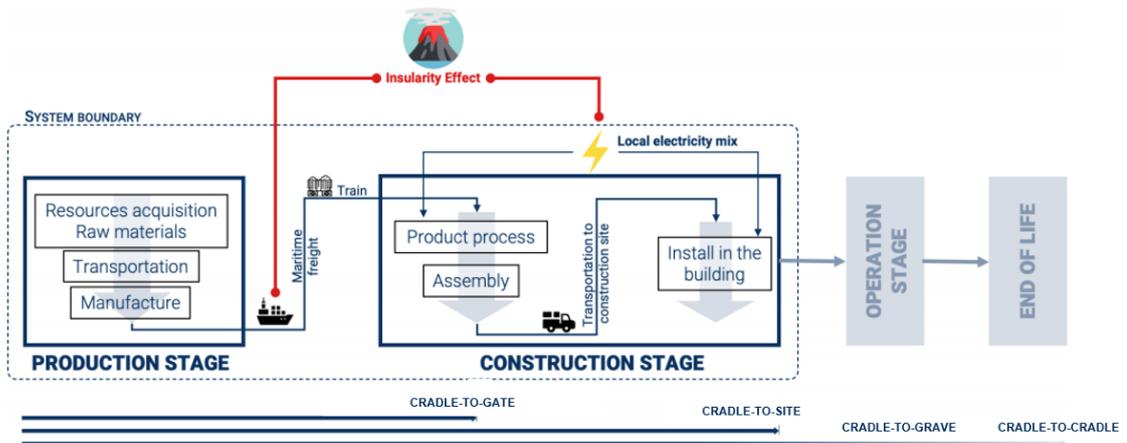


FIGURE 3.4 – Délimitation du cradle-to-site

### 3.1.2.2 Données de transport

Les données de transport ont été calculés en inter et intra-pays pour l'étude globale de ces travaux en tenant compte de l'équation 3.2 :

$$E_T = FE_t * d \quad (3.2)$$

Où,

$E_T$  est l'émission totale du transport.

$FE_t$  est le facteur d'émission du type de transport  $t$

$d$  est la distance parcourue du mode de transport (ton.kms)

Le transport intra-pays prend en compte le transport routier dans le pays d'extraction et sur le territoire réunionnais. Le transport inter-pays considère le transport maritime entre les autres pays.

### 3.1.2.3 Données de mise en oeuvre

Les données de mise en oeuvre ont été calculées en tenant compte de l'installation des matériaux et produits sur les chantiers de l'île selon l'équation 3.3. Lors de l'installation, la fixation ou la pose des produits demandent l'utilisation du mix électrique local (découpe de carrelage, découpe des plinthes, feuille de placoplâtre et autres produits). En revanche, certains d'entre eux, tels que l'isolant en vrac ou la peinture, n'ont nécessité le mix électrique local à aucun moment.

$$E_{MEO} = E_M + E_i \quad (3.3)$$

Où,

$E_{MEO}$  est l'émission de la mise en oeuvre des matériaux ou produits sur chantier

$E_M$  est l'impact du mix électrique

$E_i$  est l'émission du matériau ou produit / m<sup>2</sup>

### 3.1.2.4 Données de fonctionnement

Dans le cadre de ces travaux de thèse, les données de fonctionnement (appliquées à partir du chapitre IV), prennent en compte les matériaux, l'utilisation de l'eau, de l'électricité et de la production des déchets, selon l'équation 3.4. Dans la phase de fonctionnement des bâtis, les étapes considérées sont l'utilisation, la maintenance, la réparation, le remplacement et la réhabilitation des matériaux ou produits sur une durée de vie de 30 ans. Les déchets évalués sont les Ordures Ménagères Résiduelles (OMR), produits par les usagers.

$$E_F = E_i + E_D + E_{Eau} + E_{Elect} + P_{Dec} \quad (3.4)$$

Où,

$E_F$  est l'émission totale de la phase fonctionnelle

$E_i$  est l'émission liée à l'impact des matériaux ou produits

$E_D$  est l'émission liée à la maintenance des produits

$E_{Eau}$  est l'émission liée à l'utilisation de l'eau

$E_{Elect}$  est l'émission liée à l'utilisation de l'électricité

$P_{Dec}$  est la quantité de production des ordures ménagères résiduelles

### 3.1.2.5 Données de fin de vie

Les données de fin de vie englobent la fin de vie des bâtis : c'est-à-dire leur déconstruction. Dans cette partie de démantèlement des bâtis, le recyclage, la valorisation, la réutilisation, l'enfouissement et l'incinération sont prises en compte voir équation 3.5.

$$E_{FDV} = E_{Dec} + E_{Rec} + E_{Val} + E_{Reu} + E_{Enf} + E_{Inc} \quad (3.5)$$

Où,

$E_{FDV}$  est l'émission totale de fin de vie d'un bâti

$E_{Dec}$  est l'émission liée à la déconstruction d'un bâti

$E_{Rec}$  est l'émission liée au recyclage du produit

$E_{Val}$  est l'émission liée à la valorisation du produit

$E_{Reu}$  est l'émission liée à la réutilisation du produit

$E_{Enf}$  est l'émission liée à l'enfouissement du produit

$E_{Inc}$  est l'émission liée à l'incinération du produit

### 3.1.2.6 Identification des matériaux et produits spécifiques à l'île

La construction d'un bâti s'effectue à partir de l'extraction des ressources. Ces ressources couvrent un large spectre de matériaux ou de flux énergétiques qui sont issues de l'environnement. Ces ressources peuvent être les matières premières telles que les combustibles, les minéraux, les métaux et autres. Il est alors important aujourd'hui de considérer et d'anticiper sur ces ressources pour les raisons suivantes :

- leur caractère fini ;
- une répartition inégale des gisements à l'échelle mondiale ;
- la présence d'externalités qui sont liées aux retombées de leur extraction et leur utilisation ;
- la prédominance du secteur de l'exploitation des ressources ;
- la forte volatilité des prix ;
- la petite taille et la fragilité des économies insulaires.

Ces caractéristiques s'appliquent ainsi à de nombreux matériaux ou flux énergétiques que nous pouvons classer selon différentes typologies :

- Typologie par nature :  
Biotiques (vivantes) / Abiotiques (minéral, pétrole, énergie éolienne et autres) [Guinée 2002]  
Fossiles / Minérales
- Typologie par usage :  
Énergies / Matières
- Typologie par fréquence de renouvellement :  
Renouvelables / Non-Renouvelables Gisement (pétrole, minéral), fonds (nappes phréatiques), flux (énergie solaire, énergie marémotrice) [Finnveden 1997]

La construction des bâtis se fait principalement en deux étapes : gros œuvre (GO) dans un premier temps et second œuvre (SO) dans un second temps. Dans le cadre de ces travaux, les produits de construction qui ont été évalués pour une adaptation spécifique à l'île sont répertoriés ci-dessous :

- la structure / maçonnerie / gros œuvre / charpente ;
- les façades intérieures et extérieures ;
- la couverture / l'étanchéité ;
- les menuiseries intérieures et extérieures / fermetures ;
- l'isolation ;
- le cloisonnement / les faux plafonds ;
- le revêtement des sols et des murs / la peinture.

Le tableau ci-dessous répertorie les indicateurs qui ont été évalués. Nous avons étudié le Potentiel de réchauffement climatique (GWP), l'épuisement des ressources abiotiques (éléments) pour les ressources non fossiles (ADP-E) et combustibles fossiles pour les ressources abiotiques (combustibles fossiles) (ADP-F), le potentiel d'acidification (AP), le potentiel d'eutrophisation (EP), le potentiel de destruction de la couche d'ozone (ODP), la pollution d'ozone troposphérique (TOPP), des Composés organiques volatiles non méthaniques (NMVOC), et les matières premières secondaires (SRM) 3.5

Les équivalences des principales substances en kg équivalent selon les indicateurs sont répertoriées dans le tableau 3.1.

Les indicateurs présentés ci-dessus se réfèrent principalement aux substances relatives suivantes :

Dans la catégorie des dommages écologiques :

- aux émissions de GES comprenant les flux de gaz carbonique CO<sub>2</sub>, de méthane CH<sub>4</sub>, et de protoxyde d'azote N<sub>2</sub>O ;

### Chapitre 3. Conception d'un outil d'évaluation des impacts environnementaux

50

	GWP	ODP	AP	EP	TOPP	NMVOC	ADP-E	ADP-F	SRM
Chapitre I									
Chapitre II									
Chapitre III (MI béton)	<b>X</b>		<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		
Chapitre III (MI Bois – MI béton)	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			<b>X</b>	<b>X</b>	
Chapitre IV	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
Chapitre V (ACV – PARETO)	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>					<b>X</b>
Chapitre V (ICE)	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
Chapitre VI	<b>X</b>								

FIGURE 3.5 – Indicateurs utilisés dans ces travaux

TABLE 3.1 – Tableau d'équivalence des indicateurs

GWP		ADP-E		AP		EP		ODP	
1 kg Sub	eq CO2	1 kg Sub	eq Sb eq	1 kg Sub	eq SO2	1 kg Sub	eq PO3-4	1 kg Sub	eq CFC-11
CO2	1	Au	1	SO2	1	NO	0,13	CH3Cl	1
CH4	25	Hg	0,0922	NOx	0,7	NH3	0,35		
N2O	298	Fe	0,000000524	NH3	1,88	N	0,42		
				H2S	1,88	P	3,06		
				HF	1,6				
				HCl	0,88				

- aux émissions aériennes comprenant les flux de dioxyde de soufre SO<sub>2</sub>, d'oxyde d'azote NO<sub>x</sub>, d'ammoniac NH<sub>3</sub>, de sulfure d'hydrogène H<sub>2</sub>S, de fluorure d'hydrogène (HF), de chlorure d'hydrogène (HCl), de composés organiques volatiles non méthaniques (NMVOC), et de monoxyde de carbone (CO), qui expliquent l'acidification terrestre : c'est-à-dire l'augmentation de la quantité de substances acides dans les sols. Les effets nocifs sur la faune et la flore sont irréversibles. Elles sont à l'origine du dépérissement de certaines forêts;
- aux résidus aquatiques comprenant principalement l'azote (N) et le phosphore (P);

Dans la catégorie des dommages sur la santé :

- aux émissions liées à la destruction de la couche d'ozone (kg CFC-11 eq), composée d'atomes de fluor, des atomes de carbone et des atomes de chlore, re-

- présentant les émissions dans l'air, de gaz qui participe à la destruction de la couche d'ozone. Elle augmente les risques de cancers comme ceux de la peau ;
- aux émissions liées à l'oxydation photochimique (SMOG) (kg NMVOC) : formant l'ozone dans la troposphère (basse altitude). Elle se forme avec les émissions de certaines substances comme les composés organiques volatiles et les oxydes d'azote qui réagissent aux rayons solaires. L'ozone photochimique cause des problèmes pour la santé humaine notamment au niveau respiratoire ;

Dans la catégorie de la diminution des ressources :

- à la consommation d'énergie (ressources abiotiques) (MJ). C'est ici qu'est exprimé la quantité d'énergie non renouvelables utilisées pour la mise à disposition d'un produit, son transport, son utilisation, ou encore sa fin de vie ;
- et à l'épuisement des ressources naturelles (kg Sb eq), ou il y a la prise en compte des minéraux et carburants fossiles qui sont utilisés en fonction des réserves disponibles et de leur consommation actuelle.

### 3.1.3 Évaluation de la qualité environnementale des bâtiments à la Réunion

Appliqué au secteur du bâtiment, nos travaux se focalisent sur la problématique spécifique du logement. Une évaluation environnementale d'une maison individuelle et d'un logement collectif est réalisée, afin de déterminer l'impact environnemental de la construction des bâtis à la Réunion. Puis, d'autres évaluations sont réalisées allant jusque vingt maisons à la fois en France Métropolitaine et à la Réunion. L'évaluation environnementale des bâtis, et des maisons individuelles présentées ci-dessous considère le périmètre du berceau au site de construction.

#### 3.1.3.1 Évaluation de la construction des bâtis à la Réunion : les maisons individuelles

L'évaluation de l'impact environnemental a démarré à partir d'un bâti ayant une superficie de 90 m<sup>2</sup> SHON, située à Basse-Terre, Saint Pierre. Cette maison comprend 6 pièces. Elle est composée de 3 chambres, 1 WC, 1 salle de bain, une cuisine ouverte, un salon et une salle à manger, un couloir de dégagement, ainsi qu'une terrasse ouverte, comme nous pouvons le voir à la figure 3.6 ci-dessous.

C'est une maison classique, tenant compte des normes de construction française et des normes ISO 14040/44 [ISO 2006], de la déclaration environnementale EN 15978 [EU 2019] et de la RTAADROM. L'unité fonctionnelle a été amenée au ratio de surface plancher SHON. L'évaluation de cette maison individuelle s'est déroulée en trois étapes :

- définition des facteurs d'émissions bruts (FE) pour la Réunion ;

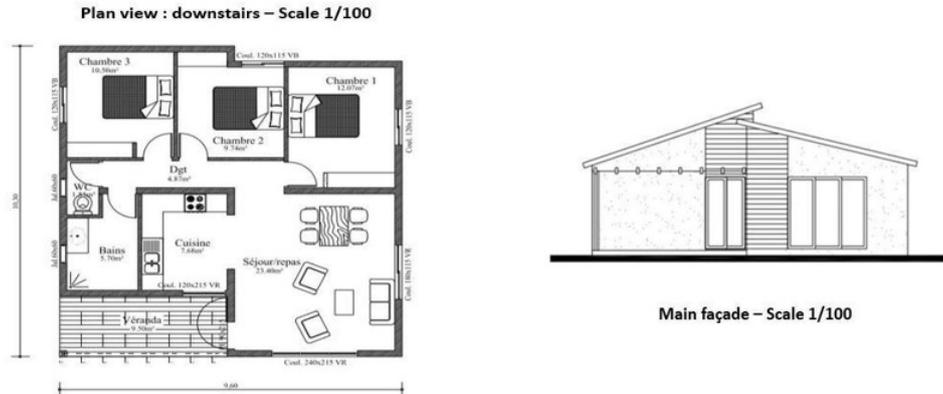


FIGURE 3.6 – Maison individuelle évaluée à la Réunion.

- quantification de ces facteurs d'émissions pour obtenir les émissions totales par catégorie d'impact ;
- enfin, l'unité fonctionnelle ramenée au m<sup>2</sup> de surface plancher a été calculée.

Dans le cadre de ces travaux, les caractéristiques des maisons, telles que la qualité de l'air, les caractéristiques acoustiques et le coût, n'ont pas été considérées dans l'unité fonctionnelle. Les premiers résultats pour la Réunion ont défini un ratio de 978 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. Le Gros Œuvre (GO) a un impact environnemental de 916,71 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> et le secteur du Second Œuvre (SO) est de 60,80 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. La figure 3.7 illustre ces secteurs. Dans le secteur du GO, le béton impacte le plus. Parmi ses composantes, nous retrouvons le ciment qui explique en grande partie 70% de l'impact total du béton.

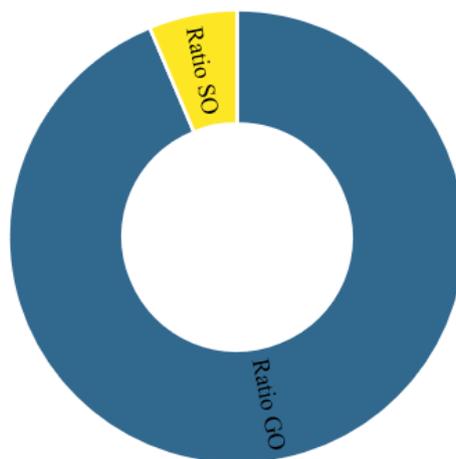


FIGURE 3.7 – Ratio GO/SO d'une maison individuelle à la Réunion.

Pour cette étude, les matériaux et produits suivants sont utilisés : béton, parpaing,

ciment, acier, céramique, isolant, aluminium, et plâtre. Les matériaux sont majoritairement importés et arrivent sur l'île soit en étant semi-finis ou finis. La majorité de ces produits demandent un assemblage en local, excepté pour l'isolant, prêt à être posé sur le chantier.

A échelle locale, le transport intra-pays a également été pris en compte malgré leur faible distance de transport entre l'usine et le site du chantier.

Le secteur du GO, explique près de 90% de l'impact total de la maison individuelle lors de sa construction.

Chaque facteur d'émission a été défini en fonction du pays d'origine du produit, de son transport, et de sa mise en œuvre sur le chantier. Les résultats illustrent que les produits obtenant un fort facteur d'émissions sont principalement : l'aluminium avec  $6,23E+02$  kg CO<sub>2</sub> eq, le béton avec  $2,88E+02$  kg CO<sub>2</sub> eq, le parpaing avec  $1,88E+02$  kg CO<sub>2</sub> eq, et l'acier avec  $5,77E+01$  kg CO<sub>2</sub> eq.

Dans l'étude comparative des 20 maisons individuelles que nous avons également évaluées par la suite, situées en France et à La Réunion, les étapes de production (approvisionnement en matières premières, transport, fabrication) et de construction (transport, construction, installation) ont été prises en compte. Les matériaux et produits utilisés dans la construction à la Réunion proviennent majoritairement de pays tels que l'Europe et l'Asie.

### 3.1.3.2 Mesure de l'effet d'insularité

Depuis les années 1950, la Réunion s'est engagée dans un processus de rattrapage économique avec la France. Dans le même temps, elle n'a pas encore achevé sa transition démographique, créant sur l'île un besoin en logements et en bâtiments, avec plus de 8 000 logements supplémentaires à construire tous les ans pour répondre au besoin de la population [Bénard-Sora 2016]. Comme la grande majorité des matériaux de construction et produits sont importés, environ 380 millions de tonnes à la Réunion en 2014, le fret représente une part importante de leur coût environnemental et économique.

Comme l'a évalué l'étude Zhang [Zhang 2013], le transport maritime présente un facteur d'émission de 15,98 g/tonnes .km de CO<sub>2</sub> lorsqu'il est comparé au fret routier, qui peut atteindre 168 g/tonnes.km de CO<sub>2</sub>. Selon la figure 3.10, il en résulte une plus grande dispersion de la distribution pour la Réunion par rapport à la métropole. L'assemblage ou la fabrication locale des produits entraîne également un surcoût environnemental. En effet, les énergies fossiles dominent encore largement la composition de la production du mix électrique local.

La mesure de l'effet de l'insularité a été effectuée dans cette étude comparative pour mettre en évidence l'écart significatif qui existe dans le secteur de la construction des bâtis dans deux milieux totalement différents. Un territoire insulaire possède une organisation spatiale originale et est donc bien souvent différente d'un territoire

TABLE 3.2 – Transport Extra-pays.

<b>Provenance</b>	<b>Acheminement</b>	<b>Distances (km)</b>
FRANCE	Suez Canal	9430
	Cape of Good Hope	14810
	Strait of Magellan	32413
	Panama Canal	32484
	Cape Horn	32528
CHINE	Direct	9395
ALLEMAGNE	Suez Canal	7628
	Cape of Good Hope	16432
	Strait of Magellan	34036
	Panama Canal	34106
	Cape Horn	34150
INDONESIE	Direct	13386
INDE	Direct	8113
ITALIE	Suez Canal	9148
	Cape of Good Hope	16271
	Strait of Magellan	33874
	Panama Canal	33945
	Cape Horn	34360
MADAGASCAR	Direct	1435
SINGAPOUR	Direct	6389
AFRIQUE DU SUD	Direct	6389

continental. Ses limites géographiques sont distinctes. L'insularité fait référence à la finitude d'une île, à un stock de ressources limités et à la fragilité des espèces endémiques sous une pression anthropique forte et très localisée [Simon 2008].

Le choix de l'origine des matériaux et produits pour la construction des bâtis n'étant pas le même pour la France et pour la Réunion, a permis d'expliquer dans un premier temps que, selon le pays d'origine des matières premières, le type de transport, la distance ainsi que l'assemblage du produit dans le pays local sont des critères qui sont spécifiques à chaque territoire. L'impact du fret maritime est également plus marqué pour un territoire insulaire comme la Réunion. Les itinéraires peuvent varier entre le Canal de Suez, le Cap de Bonne Espérance, le Détroit de Magellan, le Canal de Panama et aussi le Cap Horn. La Réunion utilise principalement le Canal de Suez. Si l'île repense son approvisionnement des ressources, nous pouvons tenter de prendre un point d'approvisionnement unique simplifié dans l'OI (Océan Indien).

### 3.1.3.3 Données statistiques de l'ACV

L'équation 3.6 définit pour cela la variabilité des valeurs d'impact d'un bâtiment. L'écart type relatif (RSD<sup>1</sup>) est exprimé en pourcentage ci-dessous :

$$RSD_{l,f_i} = \frac{\sigma_{l,f_i}}{\mu_{l,f_i}} \cdot 100 \quad (3.6)$$

Où,

$l$  est la localisation

$f_i$  est l'impact du facteur  $i$

$\sigma$  est l'écart type

$\mu$  est la moyenne

Ensuite, l'écart relatif moyen en pourcentage (PRD), tel que défini dans l'équation 3.7, représente la différence des valeurs d'impact entre les deux localisations. La base de données nationale est considérée comme référence avec :

$$\overline{PRD}^j = (1 - \bar{r}^j) \times 100 \quad (3.7)$$

avec,

$$\bar{r}^j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f_{i,national}^j}{f_{i,regional}^j} \quad (3.8)$$

où :

$f_{i,regional}$  et  $f_{i,national}$  sont les impacts du facteur  $i$ , respectivement, pour la Réunion et la France ;

---

1. relative standard deviation

Le sous-index  $i$  désigne chaque maison étudiée ;  
Et le sous-indice  $j$  désigne chacun des cinq facteurs d'impacts. Ainsi, l'écart relatif est calculé pour chacune des 20 maisons étudiées. Nous abordons également l'écart au niveau des matériaux. Nous avons pour cela proposer une approche d'identification des produits ou matériaux les plus impactant à partir d'un couplage Pareto-ACV, développée dans le chapitre V de cette thèse.

### 3.1.4 Résultats

#### 3.1.4.1 Impact environnemental à échelle d'une maison

Parmi les premiers résultats obtenus sur la comparaison des 20 maisons individuelles entre la Métropole et la Réunion, le tableau ci-dessous présente les statistiques descriptives des impacts environnementaux globaux. L'écart-type relatif (RSD) est systématiquement plus important pour la Réunion par rapport à la Métropole, sauf pour le cas du NMVOC<sup>2</sup>, cf. tableau 3.3

TABLE 3.3 – Statistiques descriptives au niveau de la base de données. *Données : Leslie Ayagapin*

	NMVOC		GWP		TOPP		AP		ADP element	
	Reunion	France	Reunion	France	Reunion	France	Reunion	France	Reunion	France
$\mu$	0.100	0.074	814.507	595.689	2.943	1.916	2.043	1.317	0.016	0.002
$\sigma$	0.035	0.028	188.571	123.786	0.701	0.419	0.500	0.284	0.005	0.003
RSD	35.24	38.53	23.15	20.78	23.82	21.87	24.49	21.56	33.47	148.84
$\overline{PRD}$	26.72		26.34		34.29		34.66		88.16	

Lorsque nous regardons de plus près, le pourcentage d'écart relatif est plus élevé pour tous les facteurs, supérieur à 26% et atteint même 88% dans le cas de l'Abiotic Depletion Potential (ADP) dans la figure 3.8.

Cette valeur plus élevée pour le cas de la Réunion s'explique en partie par un mix électrique fortement dépendant des importations du charbon. Cela entraîne ainsi un impact supplémentaire sur les minéraux, dans la fabrication et l'assemblage local des produits. Le cas particulier de la valeur élevée de la RSD pour l'indicateur du NMVOC, s'explique par la grande variété des points d'approvisionnement européens en matières premières ou en produits.

L'impact moyen du GWP des maisons individuelles est d'environ 814 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> pour la Réunion, et d'environ 595 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> pour la France métropolitaine, correspondant à un écart global d'environ 219 kg CO<sub>2</sub> eq pour le dioxyde de carbone aux deux endroits distincts. Selon ces résultats, tous les facteurs d'impacts environnementaux ont une valeur plus élevée à la Réunion.

D'après la littérature, nous pouvons considérer que les valeurs de nos ratios

2. Non Methanic Volatils Organics Compounds

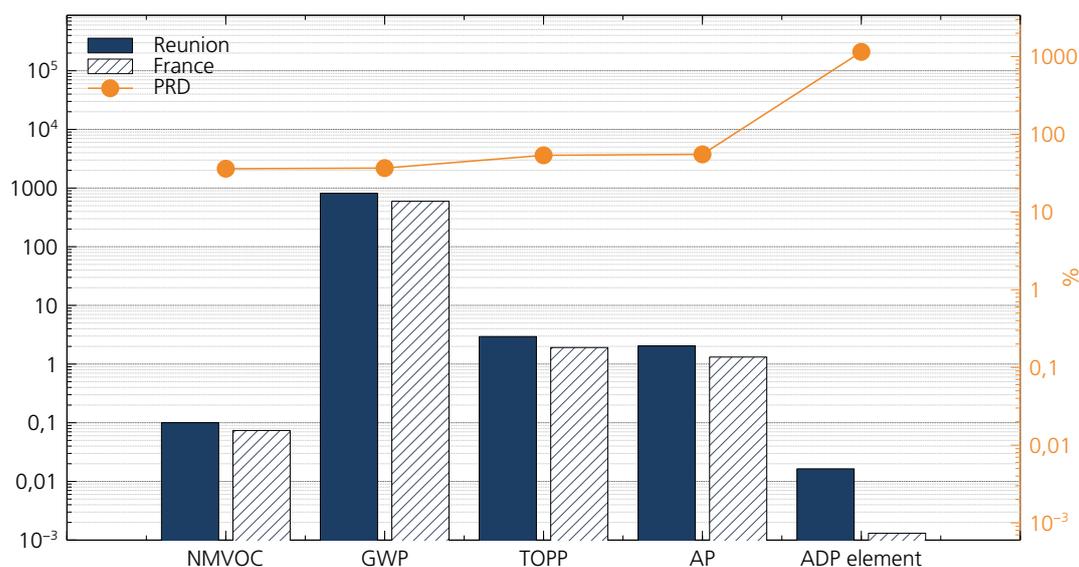


FIGURE 3.8 – Facteur PRD et valeurs moyennes des facteurs d'impacts

correspondent aux résultats obtenus dans diverses études de cas similaires dans le monde, cf. tableau 3.4. On remarque ainsi que le ratio moyen pour l'île de la Réunion est cohérent avec les valeurs élevées et obtenus dans la littérature dans le cas de la construction des bâtis en milieu insulaire tropical.

La comparaison des résultats obtenus dans la littérature ainsi que la création de la base de données locale renforce l'idée de régionaliser les bases de données pour la définition des FE spécifiques aux territoires insulaires et permettre également une ACV plus précise. En utilisant les données d'inventaire national comme référence, cela aurait conduit à une sous-estimation de 36,7% du ratio GWP si l'on appliquait directement ces ratios nationaux à notre cas local.

Deux raisons principales expliquent cette différence. Tout d'abord, mentionnée par Briguglio et al, la forte prédisposition des petites îles à importer constamment et massivement leurs marchandises et produits [Briguglio 1995]. Cependant, en raison de leur taille, elles n'ont pas une grande marge de manoeuvre, et sont alors exposées à la monnaie du modèle dominant [Bass 1993]. La deuxième raison est liée à la situation géographique de l'île. Les résultats montrent que, même si les maisons individuelles sont basées sur les mêmes réglementations et normes constructives en France et à la Réunion, du fait de son éloignement, l'île doit faire face à un surcoût supplémentaire systématique.

TABLE 3.4 – Études de cas similaires.

<b>Auteurs</b>	<b>Type de bâtis</b>	<b>GWP</b>	<b>Localisation</b>
[Dong 2015b]	Bâtiment résidentiel	669	Hong Kong
[Hoxha 2017]	Maison individuelle	415 - 615 - 1085	France
	Bâtiment résidentiel	575 - 1035 - 910	France
[Kamali 2019]	Maison individuelle	979 - 860 - 978	Canada
[Morales 2019]	Logement social	750 - 1000	Brésil
[Abd Rashid 2017]	Bâtiment résidentiel	828	Malaisie
[Ayagapin 2020]	Maison individuelle	575	France
	Maison individuelle	814	La Réunion

### 3.1.4.2 Répartition par processus de construction

Les premiers résultats obtenus dans cette thèse soulignent dans la figure 3.9 ci-dessous, que pour les maisons individuelles, c'est le secteur du GO qui a un impact environnemental plus important que le secteur du SO.

Concernant les autres indicateurs, la pollution de l'ozone troposphérique<sup>3</sup> et l'acidification<sup>4</sup> sont les indicateurs qui ont le plus d'impact sur le secteur du GO, principalement en raison de l'extraction des ressources en minerai en phase de production et de la fabrication en phase de construction. En revanche, nous notons à travers ces résultats, que dans le secteur du SO, l'épuisement des ressources abiotiques<sup>5</sup> et l'acidification des sols ont le plus grand impact, cela en raison de la partie assemblage. Cette partie assemblage se déroule en local, et est demanderesse d'énergie et de main d'œuvre.

Dans le cas de la Réunion, il est à noter que les ressources abiotiques qui sont étudiées dans cette étude comparative sont des ressources naturelles (y compris des ressources énergétiques) telles que le minerai de fer, le pétrole brut, qui sont considérées comme non vivantes. L'ADP-E englobe à la fois l'utilisation de ressources abiotiques non renouvelables et renouvelables, mais nous nous limitons à travers ce chapitre à la définition de l'épuisement des ressources non renouvelables uniquement.

Le secteur de la construction consomme en grande quantité de minerais rares pour des produits tels que l'aluminium pour la menuiserie, l'acier. Ces éléments sont importants face au choix des matériaux et des produits lors de la phase d'extraction, mais aussi lors du transport et de l'assemblage. Ceci est dû aux impacts liés à la pro-

3. TOPP : Tropospheric Ozone Pollution Project

4. AP : Acidification Potential

5. ADP - E : Abiotic Depletion Potential - elements

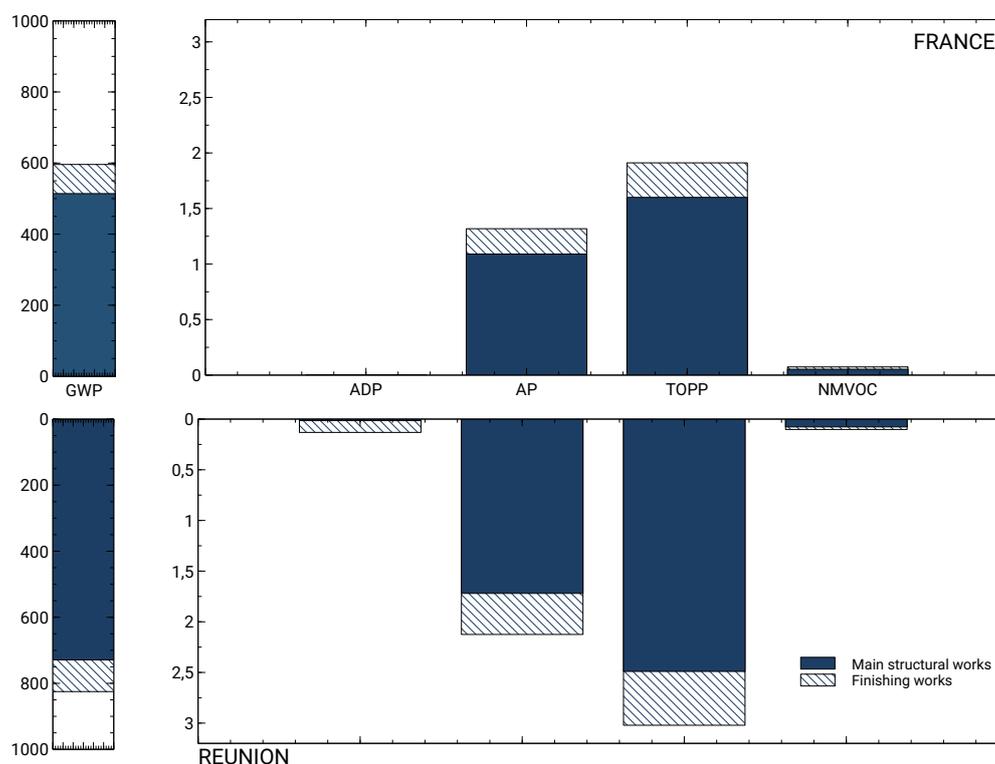


FIGURE 3.9 – Impacts des secteurs du GO et du SO pour la France et la Réunion

duction d'acier, au diesel et à la combustion des ressources fossiles.

### 3.1.4.3 Impact des matériaux de construction

Ahmad Faiz Abd Rashid et al., ont identifié dans leurs travaux que les produits les plus impactant dans leur étude sur les bâtiments résidentiels sont principalement le béton, les briques en terre cuite, les tuiles en terre cuite, les céramiques et les chapes en ciment. Ils ont alors mené un processus d'analyse des contributions, pour pouvoir identifier les matériaux ou les processus obtenant le plus fort impact environnemental. Dans leur phase de pré-utilisation, la sous-structure a été identifiée comme ayant le plus grand impact à la fois sur l'acidification, l'eutrophisation et le GWP [Abd Rashid 2015].

Dans notre étude, c'est principalement le béton qui obtient un impact considérable dans le secteur de la construction lourde, soit environ 35 à 40% de l'impact global de la maison individuelle, tant en France métropolitaine qu'à la Réunion. Nous soulignons que plus de la moitié de l'impact du béton est lié à l'utilisation et à l'intégration du ciment parmi ses composantes. Ce dernier représente plus de 70% à lui seul de l'impact total du béton. L'aluminium, a un facteur d'émission important, mais

son émission total impacte peu, d'une part en raison de sa faible quantité en m<sup>2</sup> d'aluminium installé, et d'autre part en raison de sa contribution aléatoire pour chaque maison : en effet, une maison de 100 m<sup>2</sup> peut avoir cinq ou douze ouvertures en aluminium. L'impact de la menuiserie aluminium à La Réunion s'explique notamment par l'utilisation de la production d'électricité pour la fabrication et l'assemblage du produit final.

### 3.1.4.4 Effet d'insularité

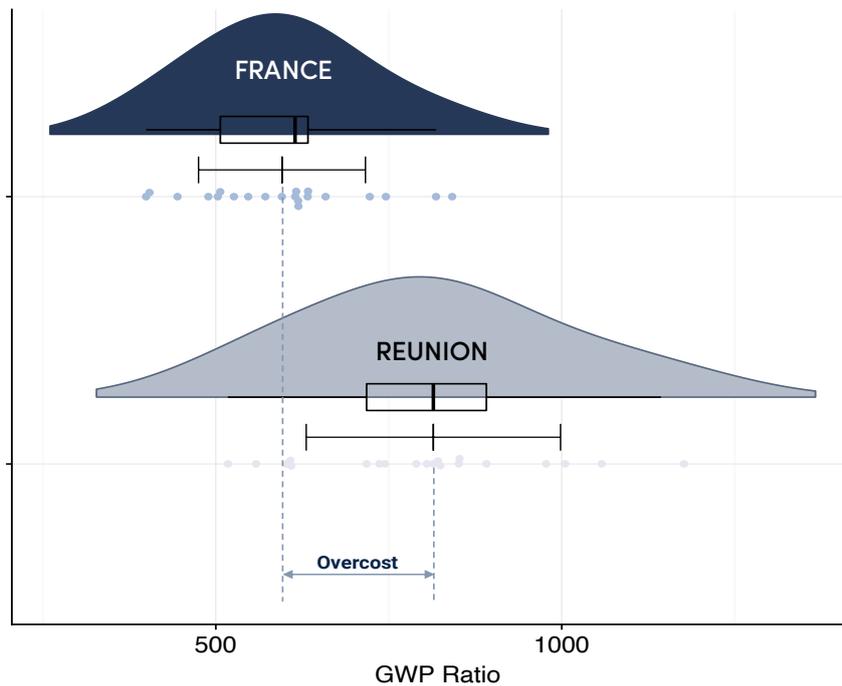


FIGURE 3.10 – Distribution des PRG des maisons pour la France et la Réunion

Depuis plus de dix ans, la part des énergies renouvelables à la Réunion ne dépasse pas les 35%. Ce mix fortement carboné a un impact sur l'étape de construction de la maison. La figure 3.10 montre la distribution du PRG<sup>6</sup> pour les MI étudiées entre les deux territoires, et la figure 3.11 montre la part représentative de l'effet d'insularité lors de l'évaluation de l'impact environnemental d'un bâti. L'effet de l'insularité est visible dans la part du mix électrique et la part du transport maritime.

Il semble évident que l'éloignement aggrave l'impact des apports exogènes de matériaux ou de produits dans le secteur de la construction. En raison de l'isolement pour 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 matériaux

6. potentiel de réchauffement global

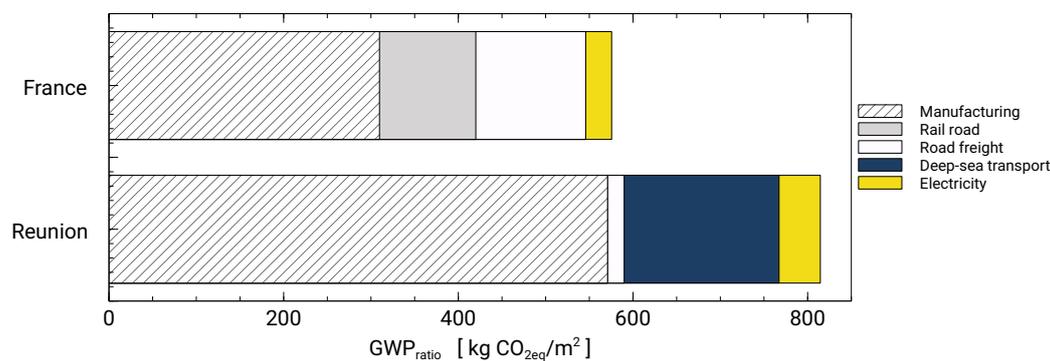


FIGURE 3.11 – Part du mix électrique et des transports du GWP pour la France et la Réunion

et produits ayant servi à la construction de ces maisons individuelles en France et à la Réunion a permis d'identifier les sources de pollution.

Le transport des matériaux vers le site de construction a des impacts environnementaux inhérents à la consommation d'énergie et aux émissions de GES qui sont associés au mode de transport. Comme l'expliquent Ramzy Kahhat et al., [Kahhat 2009], dans le cas de leur étude aux États-Unis, le transport routier a été pris en compte en raison de la distance élevée dans le pays.

Dans notre cas, en raison de la petite taille de l'île, soit 63 km de long et 45 km de large, l'impact routier possède le même facteur d'émission mais lorsqu'il est calculé en fonction des distances, l'impact du transport routier reste très négligeable à la Réunion. En dehors de l'importation massive des produits depuis la Chine, l'Europe, l'Italie, l'Indonésie et autres pays, le mix électrique de la Réunion reste hautement carbonée comparé au mix électrique de la France qui possède une part importante en énergie fissile (nucléaire).

Les résultats présentés dans l'étude de Michele Morales et al., 2020 montrent comment les hypothèses sont formulées au cours des étapes initiales de l'ACV, lors de la définition du champ d'application, telles que les exigences en matière de qualité et de représentativité des données, ou les choix de modélisation du système de produit, ou encore la durée de vie définie, qui influencent ainsi l'impact environnemental du mur [Morales 2019]. Les résultats montrent que ces choix alimentant l'ICV peuvent affecter les résultats de manière significative entre les scénarios. En effet, lorsque nous comparons l'impact environnemental de la construction d'un bâti en milieu continental et en milieu insulaire, les impacts ne correspondent pas. Ces résultats sont en accord avec une autre étude de Morales et al. (2019), qui ont comparé les résultats obtenus à partir d'un ICV utilisant des données régionalisées brésiliennes, et les résultats obtenus à partir d'un ICV regroupant des données mondiales pour analyser

le même bâtiment utilisant les mêmes matériaux de construction.

L'étude de [Häfliger 2017] a démontré que les études d'impact sont très sensibles aux données qui alimentent les bases de données, ce qui renforce les conclusions rapportées ici selon lesquelles les données utilisées pour alimenter l'ICV pourraient être plus pertinentes que les résultats réels. L'importance d'approfondir les connaissances scientifiques sur les hypothèses faites dans la modélisation du cycle de vie lors de l'ACV des bâtiments est claire.

Blengini et Di Carlo., 2010 montrent que les résultats reflètent nécessairement la combinaison complexe des caractéristiques uniques des bâtiments étudiés, des techniques de construction adoptées localement, du modèle de comportement des citoyens italiens, des conditions climatiques spécifiques au site, des réglementations locales et du mix énergétique italien [Blengini 2010] Par conséquent, les résultats ne doivent pas être généralisés, même si certaines remarques générales peuvent certainement être faites. Les travaux soulignent la nécessité de vérifier systématiquement la performance environnementale des futurs bâtiments à faible consommation d'énergie à l'aide d'une approche globale. En effet, des améliorations isolées pourraient ne pas être efficaces dans une perspective de cycle de vie, et pourraient même décevoir les attentes. Les systèmes de certification énergétique et environnementale, en Italie et ailleurs, bénéficieraient certainement de l'adoption d'une approche combinée basée sur l'ACV et les performances énergétiques.

Toutefois, il ne faut pas négliger le fait que les simplifications excessives et les généralisations à travers des outils et de bases de données non transparentes peuvent représenter une barrière importante au déploiement d'une stratégie de planification environnementale et énergétique fiable et efficace.

Les résultats que nous avons analysés dans ce premier chapitre d'application, apportent une nuance frappante. Dans la littérature, les études sur les bâtiments visent à identifier les étapes les plus impactantes et proposent une aide à la décision pour des stratégies de réduction des émissions associées. En plus du transport, notre étude comparative met en évidence l'impact significatif induit par la chaîne de processus extraction- fabrication- transformation locale. Le constat que nous soulevons est que l'effet de l'insularité se mesure davantage par la chaîne de processus qui représente, respectivement 70% et 54% du GWP pour la Réunion et la France.

### 3.1.5 Ambitions locales pour le secteur de la construction et implications politiques

Le secteur du bâtiment à la Réunion est un enjeu majeur. Ce secteur doit répondre à l'accroissement de la population qui augmente de 10 000 personnes chaque année. La demande en nouveau logement est de l'ordre de 9000 par an. Ce secteur est marqué par un flux d'importation important, et par conséquent, une industrialisation marginale. Une étude économique récente a mis en évidence un surcoût d'environ

39% des matériaux de construction par rapport à la France métropolitaine. En plus de ce surcoût, l'étude a montré l'incohérence des normes réglementaires nationales spécifiques aux usages et au contexte des territoires ultra-marins, ou il y a nécessité d'adapter les normes de construction face aux situations cycloniques et de confort thermique.

La France est actuellement en cours d'évolution de la RT2012 à la nouvelle réglementation RE2020. Cette réglementation intègre le label de préfiguration des bâtiments économes en énergie E+C-.

En 2009, une réglementation thermique spécifique aux régions d'Outre-Mer RTAADROM a été créée afin de prendre en compte le contexte climatique subtropical. Les grandes lignes de l'aspect environnemental dans le cadre de la RE2020 sont actuellement en cours d'élaboration. Cette phase est basée sur le retour d'expérience sur 1007 bâtiments en cours de construction afin de calibrer les seuils de performance souhaités. Il est primordial d'avoir une réglementation environnementale adaptée aux régions d'Outre-Mer.

Au vu des résultats, les recommandations suivantes sont élaborées : des améliorations à court terme peuvent être réalisées grâce à la décarbonisation du mix électrique : selon les scénarios développés dans les recherches de Vanessa R., 2018 [Rakotoson 2018a, Rakotoson 2018b], le facteur d'émission du mix électrique réunionnais devrait diminuer à 420 g CO<sub>2</sub>/kWh. Le mix électrique régional a un rôle important dans l'assemblage des produits sur le territoire réunionnais. Le niveau de décarbonisation dans le mix vient impacter considérablement l'impact du produit. Le second levier, lié à l'industrie du transport maritime, est davantage un enjeu global.

A 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. Les réflexions actuelles font état de deux types de mesure :

- le premier aspect est plutôt d'ordre technique, visant à l'amélioration des composants du bateau (structure) et également l'optimisation énergétique en phase d'exploitation [Olmer 2017];
- le second point concerne l'intégration des énergies renouvelables pour la production d'électricité, mais aussi une transition vers des biocarburants.

Les normes de construction françaises et européennes imposent l'importation d'un certain nombre de produits en provenance d'Europe. Il est important de connaître les voies d'approvisionnement principales pour lever les incertitudes sur les trajets maritimes en ACV. Les voies maritimes pour l'île devraient provenir essentiellement du Canal de Suez, du Cap Horne et dans l'Indianocéanie pour tenter une diminution importante des émissions. La Réunion a déjà défini une mise en œuvre adaptée de ces bâtiments en climat tropical. Ces efforts doivent aujourd'hui être soutenus et étendus aux méthodes de construction, car la taille de l'activité sectorielle fait que notre territoire subit et est vulnérable face aux coûts mondiaux des maté-

riaux. Il existe également une autre problématique sur l'île, celle de la pression environnementale : dans le contexte d'une économie insulaire, les déchets du secteur du bâtiment s'avèrent être problématiques, entraînant une pression environnementale supplémentaire sur notre territoire. L'île produit plus de 2,3 millions de tonnes de déchets, dont 13% sont issues du secteur de la construction, 36% de la rénovation et 51% lors de la démolition des bâtis [Agorah 2022]. Les politiques doivent agir de toute urgence en adoptant une chaîne de recyclage des produits de construction afin d'encourager autant que possible la réutilisation locale des matériaux. D'autres alternatives sont également à privilégier telles que la déconstruction sélective et la mise en oeuvre de réemploi des matériaux. Ces ambitions conduisent à la question du choix de matériaux entièrement ou partiellement réutilisables ou revalorisables sous une autre forme.

### **3.1.6 La place du bois à travers les ambitions de la neutralité carbone à l'horizon 2050**

Dans cette partie, nous allons tenter de comprendre quel est le rôle du bois à travers l'urgence climatique sur le long terme. Nous allons également expliquer et comparer les facteurs d'émissions de quelques produits dans les secteurs du GO et SO dans la construction des bâtiments à la Réunion, que nous aurons sélectionnés en amont. Puis nous concluons sur l'importance et l'utilité de bien utiliser le bois durant tout son cycle de vie, et surtout à faire les bons choix au moment de sa fin de vie, afin de ne pas être exposé à une libération importante du stockage carbone qu'il aurait pu emmagasiner tout au long de sa vie.

Le bois, qui est un matériau naturel, n'est pas sans impact environnemental dans sa mise en œuvre, puisqu'il doit être collecté, acheminé et transformé avant d'être utilisé. Afin d'évaluer précisément cet impact et d'identifier des voies de progrès dans une perspective de développement durable, l'ACV a été appliquée dans cette thèse pour l'évaluation environnementale des produits et dérivés du bois de l'entreprise locale FIBRES INDUSTRIES BOIS.

Bien que le bois soit appelé « matière première », dans le langage scientifique de l'ACV, ce terme s'applique aux ressources extraites de la terre. En ce sens, le bois n'est donc pas une « matière première », mais plutôt une « matière intermédiaire » obtenue à partir d'arbres extraits de la forêt. Le sol, les minéraux, l'air et l'eau de la forêt sont considérés comme étant les matières premières et l'environnement qui entoure les arbres lors de leur croissance. Il s'ensuit que les limites des études ACV impliquant le bois, doivent inclure les opérations forestières.

Selon les études et les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES), le bois a de nombreux atouts, telles que l'économie des ressources naturelles, sa capacité à être un matériau renouvelable, il aide à la lutte contre le changement climatique grâce à son stockage important de CO<sub>2</sub>. Lors de la valorisation de ses déchets, il peut

être réutilisé en matière première secondaire ou être converti en énergie pour l'utilisation de l'électricité. Le bois-énergie, dans une logique circulaire, occupe également une place de plus en plus importante dans la lutte contre le changement climatique.

Grâce à la photosynthèse, les forêts jouent également trois rôles principaux dans l'atténuation du changement climatique, en passant par l'absorption du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) :

- un premier rôle de « réservoir » du fait du stockage de carbone dans la végétation et les sols des forêts, ainsi que les produits bois ;
- et un second rôle, celui de réduire les émissions d'origine fossile grâce à l'utilisation du bois en substitution d'autres matériaux - ciment, acier, chlorure de polyvinyle, aluminium ou énergies - pétrole, charbon, gaz, qui sont consommateurs de ressources fossiles.

La notion de séquestration du carbone biogénique est encadrée pour certains produits. La norme « NF EN16485 DEP Bois ronds et sciage » précise que la séquestration du carbone biogénique ne peut être prise en compte que pour le bois provenant de pays ayant décidé d'appliquer l'Art. 3.4 du Protocole de Kyoto ou pour le bois issu de forêt gérée durablement.

Le bois, et *les matériaux de construction en bois* présentent actuellement des limites dans la manière dont les flux de carbone sont pris en compte dans les ACV. Le bilan carbone biogénique du bois est souvent considéré comme neutre, signifiant que le carbone piégé par la biomasse par le biais de la photosynthèse est considéré comme égal à la matière première de carbone dans le bois, qui est finalement libéré tout au long de son cycle. Ainsi, les impacts climatiques du bois et des matériaux de construction en bois sont actuellement très limités dans la manière dont ils ont pris en compte dans les ACV.

Les travaux de [Røyne 2016, Vogtländer 2014, Longui 2014, Tilman 2009] démontrent que cette hypothèse peut conduire à des erreurs de comptabilisation. Un récent article de [Head 2019] tente d'améliorer la comptabilisation du carbone biogénique de la phase forestière du cycle de vie des produits résineux pour le cas du Canada. Pour cela, cet auteur a modélisé les flux de carbone en fonction des espèces d'arbres, des conditions de croissance et des pratiques de gestion forestière, à partir de forêts gérées au Canada. Pour ce faire, les flux de carbone des forêts exploitées qui couvrent une gamme de conditions climatiques et de taux de perturbation ont été pris en compte. L'impact net des activités de récolte sur les coûts carbone des écosystèmes forestiers ont pu être quantifiés. On souligne que les coûts carbone de l'écosystème étudié par m<sup>3</sup> de bois récolté dans la plupart des paysages forestiers du Canada montrent une séquestration nette qui infirme l'hypothèse de neutralité en carbone. On note que la moyenne pondérée des coûts carbone de l'écosystème d'une forêt récoltée sur une durée de 100 ans, basée sur le volume récolté par espèce, varie de -0,26 à -0,069 tC par m<sup>3</sup>. Les résultats indiquent que le temps moyen pour

atteindre la neutralité des coûts de l'écosystème pour chaque espèce varie entre 16 et 60 ans. Ces résultats montrent que la collecte soutenue de bois dans les forêts, en tenant compte des taux actuels d'incendie et de récolte, entraîne des bénéfices nets de séquestration.

Selon une étude du Build Green, le type de scénario en fin de vie d'une espèce végétale a beaucoup d'impact sur l'indicateur du réchauffement climatique, dû au carbone biogénique séquestré dans le déchet [BuildGreen 2018]. Lors de l'incinération, le matériau biosourcé séquestre 1 unité de CO<sub>2</sub> eq lors de sa production. Il y a par la suite une réémission de 1 unité de CO<sub>2</sub> eq lors de l'incinération du matériau. Le bilan des flux est donc nul. Dans le cas d'une incinération avec valorisation énergétique le calcul comprend le module D de la norme européenne EN 15804 qui permet de mettre en évidence l'intérêt environnemental. En effet, ce cadre européen normatif impose de présenter les résultats d'ACV d'un produit suivant les 4 modules ci-dessous (A, B, C et D) :

- A : contenant les impacts environnementaux de la production, du transport et de la mise en œuvre ;
- B : présentant les impacts liés à la phase d'utilisation d'un produit ;
- C : décrivant les impacts liés à la fin de vie d'un produit ;
- Et D : permettant de calculer les bénéfices environnementaux, au-delà du système étudié, lié à la réutilisation, la valorisation ou le recyclage d'un produit.

Après le cas de l'incinération, le scénario de la mise en décharge sans torchage<sup>7</sup> du méthane sur 100 ans, indique une réémission sur 100 ans due à la dégradation du matériau. Lors de cette réémission, du CO<sub>2</sub> et du CH<sub>4</sub> sont rejetés. L'absence de torchage, qui correspond à brûler par des torchères des rejets de gaz fossile, entraîne à ce moment-là un rejet de 100% du CH<sub>4</sub> dans l'atmosphère. Dans ce scénario, le bilan des flux est positif, il y a donc potentiellement une contribution au réchauffement climatique.

Cette fois-ci, dans le cas d'un scénario de mise en décharge avec torchage du méthane sur 100 ans, le matériau biosourcé séquestre aussi 1 unité de CO<sub>2</sub> eq lors de sa production. Lors de cette réémission, le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub> sont rejetés également dans l'atmosphère. La présence de torchage permet de récupérer 70% du CH<sub>4</sub>. Dans ce scénario, le bilan des flux est négatif, il y a donc séquestration du carbone biogénique.

Enfin, dans le scénario pour la valorisation matière, le matériau biosourcé séquestre 1 unité de CO<sub>2</sub> eq lors de sa production également. Le matériau est ensuite réutilisé lors d'une seconde vie. On compte ainsi les impacts qu'il aurait engendré en fin de vie, puis les impacts évités dus à sa revalorisation matière. Dans ce scénario, le bilan des flux est négatif, si on considère la seconde vie. Cependant, dans le cadre

---

7. ou brûlage des gaz

d'une ACV, la seconde vie dépasse les frontières du système. Le bilan est donc nul. Par conséquent, si nous souhaitons mettre en évidence l'intérêt environnemental, il est nécessaire de calculer le module D de la norme européenne, et selon la figure 3.12.

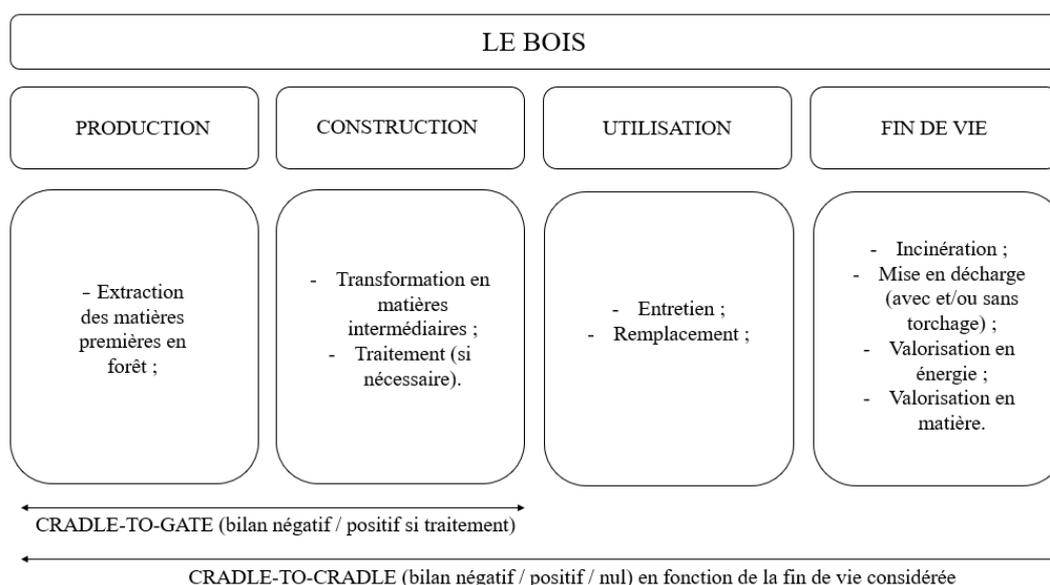


FIGURE 3.12 – ACV du bois

A échelle nationale, le rôle des forêts dans l'atténuation du changement climatique est un enjeu majeur dans la mise en œuvre de l'objectif de la SNBC. En effet, cet objectif est d'atteindre à la neutralité carbone en 2050. La SNBC-2 prévoit alors en 2050, un puit d'environ 82 Mt CO<sub>2</sub> eq composé surtout du puit forestier (35 Mt CO<sub>2</sub> eq), des produits bois - bois de construction, ou meubles ou papier à hauteur de 20 Mt CO<sub>2</sub> eq, des autres terres - sols agricoles à hauteur de 10 Mt CO<sub>2</sub> eq ; le tout complété par 15 Mt CO<sub>2</sub> eq de captage et stockage de carbone (CSC). Cette prévision permet planifier une gestion soutenable des ressources forestières. Pour cela, une certification existe. C'est un moyen d'assurer la gestion durable d'une forêt confirmant que son exploitation ne remet pas en question sa santé ni sa survie à long terme. En France, plus d'une forêt sur trois est certifiée. Le PEFC, qui est une association internationale qui a été créée en 1999, se bat pour que les forêts soient à la fois respectées et entretenues. Des règles précises existent aujourd'hui pour tous les acteurs de la filière du bois.

Selon le CITEPA, le rôle du bois dans la neutralité carbone et dans les émissions actuelles en France passe par des engagements ambitieux [CITEPA 2021]. En effet, le 1er Février 2021, la Fédération nationale du Bois (FNB, organisation professionnelle des acteurs de la mobilisation et de la transformation du bois en France) a annoncé son « Plan Ambition Bois 2030 ». L'objectif de croissance de l'utilisation du bois français s'inscrit dans deux contextes :

- Celui de la mise en place de la RE2020, remplaçant la réglementation thermique existante RT2012 en matière de construction, pour diminuer l'impact carbone global (matériaux, efficacité thermique);
- Et celui d'avoir un objectif politique de gestion forestière plus forte pour le développement du stockage carbone dans les produits bois à longue durée de vie, objectif inscrit notamment dans la SNBC révisée de 2020, mais qui rejoint cependant la SNMB (Stratégie Nationale de Mobilisation de la biomasse) de 2018 introduit par la Loi sur la Transition énergétique - LTE 2015, ou le PNFB (Programme National de la forêt et du bois) de 2014, fixant les orientations de la politique forestière sur la période 2016-2026.

Le Programme national Forêt Bois (PNFB) qui fait partie de la SNBC, se traduit par différentes actions : les éclaircies dans les futaies, régénération naturelle, maintien des îlots d'arbres anciens pour préserver la biodiversité, la restauration par plantation des forêts dégradées.

Face à la neutralité carbone et l'urgence climatique, les forêts et notamment les sols forestiers constituent le deuxième plus grand puits de carbone de la planète après les océans. Jusqu'à sa maturité, un peuplement forestier capture du CO<sub>2</sub>, participant ainsi à la réduction de la présence de GES dans l'atmosphère. Une fois collectés, les arbres continuent de jouer leur rôle de « stockage de carbone sur le long terme, et peuvent être substitués à des matériaux plus énergivores ». Le rapport du GIEC 2019 rappelle également que la gestion durable des forêts permet de préserver ou d'améliorer la séquestration de carbone biogénique.

A la Réunion, l'entreprise de FIBRES INDUSTRIES BOIS possède cette certification de programme de reconnaissance des certifications forestières (PEFC), qui est un label environnemental apposé sur ses produits bois, visant à promouvoir et à certifier sa gestion durable des forêts. Elle possède également le Label environnemental FSC (Forest Stewardship Council), qui assure que la production de bois ou d'un produit à base de bois respecte les procédures censées garantir la gestion durable des forêts. Le groupe FIBRES s'appuie sur un réseau à la fois international, national et local pour éco-certifier sa chaîne de contrôle. C'est pourquoi, elle possède également le label CTB-B+, qui certifie cette fois-ci la qualité du traitement de ses bois résineux dans le respect des normes de sécurité et d'environnement. Cette certification, exclusive dans l'Océan Indien, garantit que l'essence est durable et protégée contre les insectes, les pourritures, les champignons et les termites.

Parmi les produits évalués dans ces travaux, nous avons choisi de présenter les résultats de différents matériaux et produits dans les secteurs du GO et du SO, à la fois pour les maisons individuelles mais également pour les immeubles de logement collectif. Nous avons sélectionné pour cela des produits ayant des composantes comme le ciment, la bauxite, l'extrait d'alumine, la laine de verre, que nous retrouvons majoritairement dans la construction des bâtis à la Réunion La définition de leur facteur

d'émission dans leur total de cycle de vie est présentée ci-dessous :

Nous constatons à travers le Tableau 3.5 que dans le cas des indicateurs du GWP, de l'ODP<sup>8</sup>, de l'AP, de l'EP et de l'ADP-F<sup>9</sup>, ce sont « le béton » et « la laine de roche » qui obtiennent un facteur d'émission plus élevé que les autres indicateurs principalement en phases de production et de construction. Cependant, nous constatons que pour le cas du GWP, le dallage en béton présente un facteur d'émission élevé en phase de production à 2,88E+02 kg CO<sub>2</sub> eq, dû à l'extraction de ses composantes, en particulier du ciment. Dans le cas de l'ODP, c'est principalement la laine de roche qui obtient un facteur d'émission élevé, à la fois en phase de production, dû à l'extraction du basalte et de la dolomite, et dû à l'utilisation du coke comme combustible pour le processus de fusion, en phase de construction également. Dans le cas de l'ADP-E, c'est le béton qui impacte majoritairement, cela étant dû au à l'extraction des minerais.

Pour le cas du bois, les échanges de CO<sub>2</sub> biogénique ont été considérées en fonction du GHG Protocol. Le pin sylvestre que nous avons pris en compte provient d'une forêt gérée durablement en milieu continental. Selon Brown et al., l'absorption de CO<sub>2</sub> par les arbres est considérée comme une émission négative, égale au contenu en carbone du bois [Brown 1997]. Cette quantité d'absorption est estimée selon l'Institut Français de la Forêt, en tenant compte du volume des arbres (20,46 Mm<sup>3</sup>), de la densité du bois (0,51 t sèche.m<sup>3</sup>), du facteur de croissance des arbres (1,6) et en tenant compte également de la fraction de carbone par matière sèche (0,5 t C/(t sèche)) par défaut [Colin 2005]. Pour cette forêt gérée durablement, le stock CO<sub>2</sub> dans les arbres est estimé à 1,50 t CO<sub>2</sub> m<sup>3</sup> de bois sec.

Concernant les résultats du bois – en pin sylvestre traité, son facteur d'émission est plus important lors de sa phase de production pour les indicateurs tels que l'ODP, l'EP et l'ADP-E. Cependant, il est également important en phase de construction pour le cas de l'ADP-E, s'expliquant par le traitement utilisé en autoclave, que nous pouvons voir à travers la figure 3.13 ci-dessous, qui consiste à protéger le bois face aux agressions extérieures (champignons, insectes...).

Ce procédé permet un trempage du bois dans l'autoclave. Ce dernier est un tube long sous pression où l'on injecte un produit de préservation. Grâce à ce procédé, on obtient alors une meilleure pénétration du produit dans le bois *permettant d'être classé « Classe IV »* et à être utilisé en extérieur sous un climat subtropical.

Dans les travaux de Marine Fouquet, lors de l'évaluation de 3 maisons (OB-I ossature bois incinération, OB-E ossature bois enfouissement, DM double mur de bloc béton et BB maison en béton banché), elle indique que la fin de vie de la maison en bois est moins impactante si l'enfouissement est privilégié à l'incinération, car 97% du carbone séquestré par le bois reste stocké de manière permanente. De plus, elle

---

8. Ozone Depletion Pollution

9. Abiotic Depletion Potential - fossils fuels

### Chapitre 3. Conception d'un outil d'évaluation des impacts environnementaux

70

TABLE 3.5 – Facteurs d'émissions de différents produits pour les maisons individuelles

<b>GWP</b>				
	<b>Production</b>	<b>Construction</b>	<b>Utilisation</b>	<b>Fin de vie</b>
Dallage logement ép.25cm	2,88E+02	1,96E+01	-2,30E+01	1,44E+01
Cloison de distribution	3,72E+00	3,84E-01	0,00E+00	5,79E-02
Porte coulissante 3 VTX en alu	7,76E+01	6,77E+00	0,00E+00	9,95E-01
Claustra métal fibro-ciment + porte	-8,77E+00	1,68E+00	4,93E-03	1,90E+01
Isolant phonique	2,44E+01	4,85E+00	3,81E-01	4,74E-01
Porte fenêtre en PVC	-1,90E+01	8,57E+00	9,70E+00	1,89E+01
<b>ODP</b>				
Dallage logement ép.25cm	5,20E-07	2,55E-06	0,00E+00	3,09E-06
Cloison de distribution	1,50E-07	4,33E-08	0,00E+00	4,36E-08
Porte coulissante 3 VTX en alu	6,52E-06	2,93E-06	0,00E+00	4,88E-07
Claustra métal fibro-ciment + porte	1,46E-06	1,89E-07	1,44E-11	4,48E-08
Isolant phonique	9,78E-08	3,99E-09	9,98E-08	3,78E-13
Porte fenêtre en PVC	4,99E-07	9,48E-08	2,78E-07	3,99E-08
<b>AP</b>				
Dallage logement ép.25cm	1,40E+00	3,77E-02	0,00E+00	9,66E-02
Cloison de distribution	8,91E-03	2,30E-04	0,00E+00	3,84E-04
Porte coulissante 3 VTX en alu	7,98E-01	5,28E-02	0,00E+00	6,70E-03
Claustra métal fibro-ciment + porte	6,60E-02	9,60E-03	2,60E-05	3,96E-03
Isolant phonique	2,80E-02	8,40E-03	1,74E-03	1,72E-03
Porte fenêtre en PVC	2,74E-02	9,97E-03	1,42E-02	2,38E-03
<b>EP</b>				
Dallage logement ép.25cm	1,10E-01	6,55E-03	0,00E+00	2,13E-02
Cloison de distribution	8,28E-04	1,40E-04	0,00E+00	8,60E-05
Porte coulissante 3 VTX en alu	7,55E-02	6,90E-03	0,00E+00	1,93E-03
Claustra métal fibro-ciment + porte	9,95E-03	1,72E-03	6,95E-06	9,45E-03
Isolant phonique	2,88E-03	1,77E-03	3,81E-04	1,93E-04
Porte fenêtre en PVC	3,93E-03	2,53E-03	1,82E-03	4,97E-04
<b>ADP-E</b>				
Dallage logement ép.25cm	3,34E-04	5,22E-08	0,00E+00	8,99E-06
Cloison de distribution	1,50E-07	9,98E-09	0,00E+00	7,42E-11
Porte coulissante 3 VTX en alu	2,29E-05	7,53E-07	0,00E+00	4,96E-07
Claustra métal fibro-ciment + porte	3,66E-05	2,91E-05	4,99E-08	4,79E-07
Isolant phonique	1,78E-05	7,66E-07	3,50E-07	7,98E-08
Porte fenêtre en PVC	6,89E-06	9,13E-07	1,46E-05	3,10E-07
<b>ADP-F</b>				
Dallage logement ép.25cm	2,19E+03	1,99E+02	0,00E+00	2,64E+02
Cloison de distribution	3,99E+01	4,51E+00	0,00E+00	7,68E-01
Porte coulissante 3 VTX en alu	1,41E+03	8,90E+01	0,00E+00	2,10E+01
Claustra métal fibro-ciment + porte	9,98E+01	2,76E+01	8,92E-02	4,79E+00
Isolant phonique	1,70E+02	5,50E+01	2,80E+00	6,90E+00
Porte fenêtre en PVC	5,84E+01	5,89E+01	7,80E+01	3,75E+00

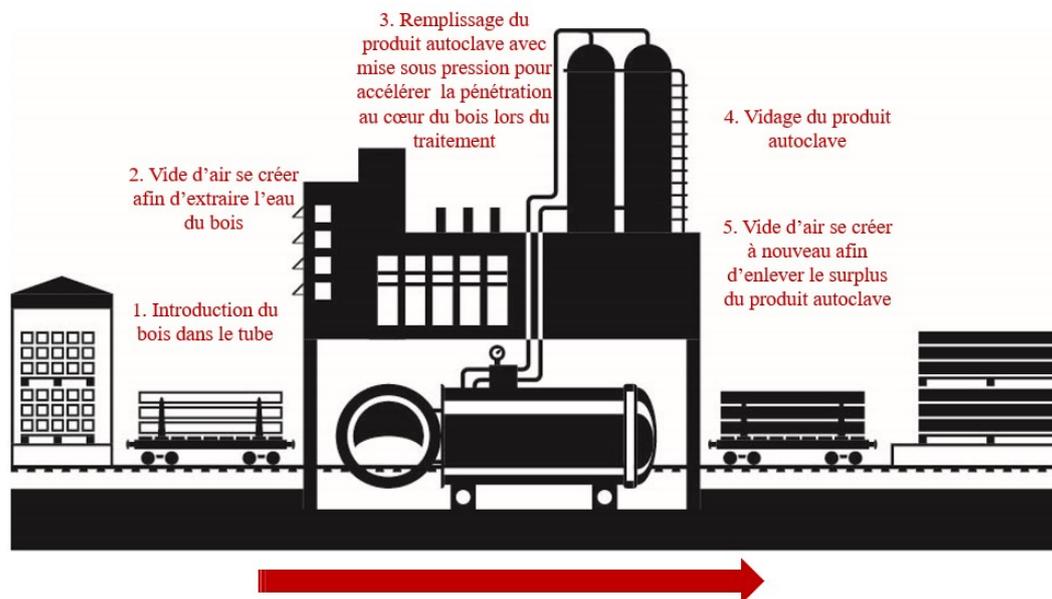


FIGURE 3.13 – Procédé du traitement autoclave

souligne également que 75% du méthane est relâché et est supposé être récupéré et brûler en torchère – relâché sous forme de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère [Fouquet 2015a]. L'incinération est moins impactante que l'enfouissement à la condition où le carbone biogénique n'est pas considéré.

Selon d'autres travaux, comme dans ceux de E.I Wiloso et al., les variations dans l'inventaire du carbone biogénique peuvent être facilement constatées dans les pratiques de l'ACV [Wiloso 2012]. Il a examiné à travers divers travaux, différentes approches concernant la comptabilisation des GES pour le carbone biogénique [Johnson 2009, Liska 2014, Wiloso 2012, Sheehan 2014].

Ces différentes approches d'inventaires incitent souvent à la confusion lors de l'interprétation, en raison de leurs résultats finaux divergents. Ainsi, les approches d'inventaires, ainsi que les périmètres d'études ne permettent pas d'obtenir des résultats finaux comparables. Malgré les différences, l'utilisation du bois, tant sur le plan énergétique que matériel, peut contribuer à atténuer le changement climatique lorsqu'il remplace des matériaux à forte intensité de carbone. En effet, l'utilisation de ce dernier dans des produits ayant une longue durée de vie peut en outre contribuer à augmenter la quantité et la durée de stockage de carbone (c) dans l'anthroposphère.

Selon Sirkin et al., l'utilisation en cascade du bois – les multiples utilisations matérielles des ressources en bois avant leur conversion en énergie a été signalée comme une stratégie permettant d'améliorer l'efficacité des ressources et contribuer à l'économie circulaire en prolongeant la durée de vie de la ressource en bois [Sirkin 1994, Carus 2018]. L'évaluation environnementale en cascade à sorties multiples reste difficile en raison des différents produits et étapes de recyclage impliqués

et de la distribution des émissions, notamment de CO<sub>2</sub> biogénique, sur de longues périodes.

Dans la construction des immeubles de logements collectifs, nous avons constaté que c'est la phase de production qui impacte le plus dans le total de cycle de vie des produits évalués voir Tableau 3.6. Lorsque nous analysons de plus près les résultats obtenus, nous constatons que l'indicateur le plus élevé est une fois de plus le potentiel d'épuisement des ressources en combustibles fossiles.

Parmi les indicateurs présentés ci-dessus, dans le cadre de l'évaluation des matériaux et produits à travers la construction des immeubles sur l'île, nous constatons que pour l'ODP, le PVC possède un facteur d'émission élevé, de par la présence du pétrole et des résidus issus de la transformation du pétrole lors de sa phase de production. Pour les indicateurs du GWP, de l'AP, et de l'EP, le béton possède un facteur d'émission considérable en phase de production, comme nous l'avons vu également lors de l'analyse des FE des matériaux et produits pour la construction des maisons individuelles. Enfin, pour le cas de l'ADP-F, nous soulignons qu'en phase de production, le béton, comme le PVC et l'aluminium connaissent un FE considérable, compris entre 2500 et 3500 MJ. Les ressources fossiles expliquent grandement ces FE élevés, y compris pour la cloison et le claustra.

Selon la littérature, l'évaluation des impacts environnementaux à échelle des bâtis dans les milieux tropicaux/ insulaires sont publiées sous forme « d'étude de cas », ou l'ACV est appliquée à différents type de bâtiments résidentiels en ayant pour délimitation le Cradle-to-gate. Nous constatons ainsi à travers le tableau ci-dessous que les facteurs d'émissions obtenus pour les matériaux et produits étudiés pour la construction en milieu insulaire, obtiennent les mêmes ordres de grandeur que les résultats que nous avons obtenus de nos processus dans le cadre de ces travaux cf. tableau 3.7. Les unités présentées dans ce tableau sont exprimées en kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.

Comme l'indique les données de la littérature, les bâtiments tertiaires et hangars obtiennent un impact environnemental compris entre 30 et 85 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, les immeubles obtiennent un impact environnemental compris entre 600 et 850 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, et enfin, les maisons individuelles obtiennent un impact environnemental entre 400 et 1050 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.

Parmi les résultats obtenus, on constate également que l'impact des produits présentés ci-dessus varient en fonction des indicateurs étudiés. Il est primordial de souligner l'importance d'une évaluation environnementale complète en tenant compte de plusieurs catégories d'impact, au lieu d'effectuer un « bilan carbone », ou le GWP est le seul indicateur considéré.

TABLE 3.6 – Facteurs d'émissions de quelques produits pour les logements résidentiels

<b>GWP</b>				
	<b>Production</b>	<b>Construction</b>	<b>Utilisation</b>	<b>Fin de vie</b>
Dallage logement ép.25cm	7,1E+02	6,79E+01	-2,34E+00	5,15E+01
Cloison de distribution	7,67E+01	2,56E+01	0E+00	4,92E+00
Porte coulissante 3 VTX en alu	8,8E+01	3,75E+00	4,74E-02	2,47E+00
Claustra métal fibro-ciment + porte	4,1E+01	4,4E+00	0E+00	2,36E+00
Isolant phonique	2,4E+00	2,68E-01	0E+00	1,44E-02
Porte fenêtre en PVC	1,52E+02	1,9E+01	0E+00	3,95E+00
<b>ODP</b>				
Dallage logement ép.25cm	1,05E-05	2,05E-06	0E+00	2,4E-06
Cloison de distribution	5,88E-06	2,98E-06	0E+00	6,4E-07
Porte coulissante 3 VTX en alu	6,97E-06	6,6E-07	2,63E-09	2,79E-07
Claustra métal fibro-ciment + porte	2,34E-06	7,92E-07	0E+00	3,4E-07
Isolant phonique	6,65E-07	1,67E-07	0E+00	1,28E-08
Porte fenêtre en PVC	5,7E-05	2,19E-06	0E+00	3,91E-07
<b>AP</b>				
Dallage logement ép.25cm	1,65E+01	3,7E-01	0E+00	1,7E-01
Cloison de distribution	1,86E-01	7,2E-02	0E+00	3,85E-02
Porte coulissante 3 VTX en alu	5,95E-01	9,1E-03	2,34E-04	5,44E-03
Claustra métal fibro-ciment + porte	1,69E-01	1,66E-02	0E+00	3,92E-03
Isolant phonique	7,28E-03	1,22E-03	0E+00	7,78E-05
Porte fenêtre en PVC	4,84E-01	4,3E-02	0E+00	9,99E-03
<b>EP</b>				
Dallage logement ép.25cm	9,98E-01	1,5E-02	0E+00	1,33E-01
Cloison de distribution	2,89E-02	8,66E-03	0E+00	3,95E-03
Porte coulissante 3 VTX en alu	7,33E-02	1,37E-03	4,81E-04	1,56E-03
Claustra métal fibro-ciment + porte	2,2E-02	9,03E-03	0E+00	1,89E-03
Isolant phonique	1,25E-02	3,32E-04	0E+00	1,82E-05
Porte fenêtre en PVC	1,56E-01	1,59E-02	0E+00	1,97E-03
<b>ADP-E</b>				
Dallage logement ép.25cm	4,5E-03	4,32E-06	0E+00	9,9E-04
Cloison de distribution	2,78E-05	4,22E-06	0E+00	6,84E-09
Porte coulissante 3 VTX en alu	7,43E-03	1,27E-05	1,45E-07	6,32E-06
Claustra métal fibro-ciment + porte	9,72E-06	8,3E-06	0E+00	7,99E-08
Isolant phonique	2,26E-06	2,39E-09	0E+00	2,8E-09
Porte fenêtre en PVC	6,26E-03	8,1E-05	0E+00	4,52E-06
<b>ADP-F</b>				
Dallage logement ép.25cm	3,46E+03	3,45E+02	0E+00	3,2E+02
Cloison de distribution	7,1E+02	3,64E+02	0E+00	5,16E+01
Porte coulissante 3 VTX en alu	1,66E+03	6,42E+01	3,98E-01	1,76E+01
Claustra métal fibro-ciment + porte	6,77E+02	6,23E+01	0E+00	8,81E+00
Isolant phonique	2,85E+01	2,61E+00	0E+00	1,79E-01
Porte fenêtre en PVC	2,22E+03	1,66E+02	0E+00	3,2E+01

TABLE 3.7 – Comparaison des résultats pour l'évaluation des impacts environnementaux pour les bâtiments résidentiels

Bâtis	Données littérature	Données adaptées	Auteurs
Bâtiments tertiaires - Hangars	37	84	[Schlegl 2019]
Bâtiments tertiaires - Hangars	33,4	63,2	[Schlegl 2019]
Bâtiments tertiaires- Hangars	32,9	50,8	[Schlegl 2019]
Residential building	828	831	[Abd Rashid 2017]
SFB & MFB	580	619	[Morales 2019]
Residential building	665	773	[Dong 2015a]
Single family houses	415 – 615 – 1085	599 – 706 - 1150	[Hoxha 2017]
Single family buildings	979 – 860 - 978	990 - 872 - 1000	[Kamali 2019]

A titre récapitulatif, le bilan des flux est alors nul, dans le cas d'une incinération (puisque le matériau biosourcé séquestre 1 unité de carbone de CO<sub>2</sub> eq lors de sa phase de production et ré-émet 1 unité de CO<sub>2</sub> eq lors de son incinération. Nota : *A la Réunion, le cas de l'installation d'un équipement type « incinérateur » est aujourd'hui en cours de négociation entre les communes de l'île.*

Le bilan des flux est positif, dans le cas où il y a mise en décharge sans torchage de méthane, mais il peut y avoir un bilan des flux négatif, dans le cas où il y a mise en décharge avec torchage de méthane sur une durée de 100 ans.

Pour le cas de la valorisation du bois en énergie, il possède un bilan négatif, et en valorisation matière, il possède un bilan des flux nul, dans le cas d'une ACV complète sans dépasser la limite du périmètre « cradle-to-end-of-life ». En revanche, le bilan des flux serait négatif, si la limite du périmètre tiendrait compte du « cradle-to-cradle ».

#### **3.1.7 Étude comparative de la construction d'un bâti en bois et d'un bâti en béton**

TABLE 3.8 – Comparaison MI Bois / MI Béton

Materiaux et produits	GWP (kg CO2 eq)		ODP (kg CFC-11)		AP (kg SO2 eq)		EP (kg CH43- eq)		ADP-E (kg Sb eq)		ADP-F (MJ)	
	Bati en bois	Bati en béton	Bati en bois	Bati en béton	Bati en bois	Bati en béton	Bati en bois	Bati en béton	Bati en bois	Bati en béton	Bati en bois	Bati en béton
Dallage en béton	5,19E+04	5,19E+04	9,38E-05	9,38E-05	1,06E+02	1,06E+02	8,79E-03	8,79E-03	6,05E-02	6,05E-02	2,42E+04	2,42E+04
Ossature bois / mur en parpaing	-1,65E+01	2,55E+04	1,39E-10	-1,03E-05	-1,42E-01	5,15E+01	-3,98E-07	4,64E-03	-1,18E-05	3,38E-02	3,40E+02	7,45E+04
Poutre (bois / béton)	4,27E-01	1,64E+02	-6,96E-12	1,26E-07	2,58E-03	1,16E+00	1,77E-07	2,58E-05	1,26E-06	4,76E-04	7,32E+02	8,89E+02
Enduit ITE	3,54E+03	3,54E+03	5,63E-07	5,63E-07	1,33E+01	1,33E+01	7,37E-04	7,37E-04	1,12E-02	1,12E-02	1,77E+04	1,77E+04
Enduit plâtre (exterieur)	4,03E+03	4,03E+03	6,49E-07	6,49E-07	1,46E+01	1,46E+01	1,02E-03	1,02E-03	1,26E-02	1,26E-02	4,90E+04	4,90E+04
Toiture en acier galvanisé	4,96E+03	4,96E+03	-1,97E-08	-1,97E-08	1,52E+01	1,52E+01	6,28E-02	6,28E-02	1,35E-02	1,35E-02	4,10E+04	4,10E+04
Chape flottante	4,16E+03	4,16E+03	1,77E-07	1,77E-07	1,10E+01	1,10E+01	8,24E-04	8,24E-04	8,81E-03	8,81E-03	3,30E+04	3,30E+04
Charpente (bois / acier)	-1,39E+04	5,18E+02	2,37E-05	-2,56E-06	6,45E+03	1,68E+00	5,88E-01	4,63E-05	9,58E-01	1,61E-03	3,99E+03	9,75E+03
Bloc polystyrène -isolant sous chape	4,99E+02	4,99E+02	1,47E-06	1,47E-06	1,49E+00	1,49E+00	8,90E-04	8,90E-04	1,33E-03	1,33E-03	7,11E+04	7,11E+04
Isolant (laine de verre)	1,30E+03	1,30E+03	-1,51E-08	-1,51E-08	6,30E+00	6,30E+00	3,36E-04	3,36E-04	3,83E-03	3,83E-03	1,95E+04	1,95E+04
Plafonds en placo	1,82E+03	1,82E+03	1,67E-06	1,67E-06	1,41E+01	1,41E+01	7,22E-06	7,22E-06	7,28E-03	7,28E-03	6,29E+04	6,29E+04
Bloc polystyrène -isolant	-1,21E+03	6,86E+02	1,17E-07	1,10E-07	-2,27E+01	2,49E+00	-5,46E-04	1,73E-04	5,60E-03	2,15E-03	1,15E+04	8,34E+03
Revêtement sol (parquet/carrelage)	1,27E+01	1,00E+04	-3,41E-10	-8,37E-08	1,16E-01	2,59E-02	3,14E-07	8,73E-04	4,08E-05	2,59E-02	2,52E+02	1,24E+05
Portes et menuiseries (bois/aluminium)	4,83E+03	9,91E+03	2,60E-06	8,22E-05	4,73E+01	4,73E+01	2,34E-04	2,34E-04	4,14E-02	2,43E-02	5,50E+04	3,77E+04
<b>EMISSIONS TOTALES PAR BÂTI</b>	<b>61925,66</b>	<b>118987</b>	<b>0,000125</b>	<b>0,000168</b>	<b>6656,77</b>	<b>286,35</b>	<b>0,663</b>	<b>0,081</b>	<b>1,124</b>	<b>0,207</b>	<b>390214</b>	<b>573579</b>

Pour l'étude du bois, nous avons choisi de comparer une maison individuelle construite à partir du bois et du béton. Les résultats ont montré dans un premier temps qu'une maison individuelle en béton est plus impactante pour les indicateurs du GWP, de l'ODP et de l'ADP-F, et qu'une maison construite en bois, est plus impactante pour les indicateurs de l'AP, l'EP et de l'ADP-E. Ces résultats soulignent l'importance d'effectuer une analyse environnementale regroupant plusieurs indicateurs afin de ne pas biaiser le résultat eu égard du GWP. Le fait que si l'on considère uniquement l'évaluation au stade d'un bilan carbone, la même maison construite en bois aurait un bilan carbone moins impactant que si elle aurait été construite à partir du béton (MI Bois > 4,07E+02 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> et MI Béton > 7,83E+02 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.)

Lorsque nous analysons les indicateurs entre eux, nous constatons que les produits bois et dérivés du bois ont des émissions inférieures à ceux des produits ordinaires tels que le béton. Cela s'explique par la phase de production dans un premier temps, lors de l'extraction des matières premières pour le béton et des matières intermédiaires pour le bois. A ce stade, les extractions en minerai pour le ferrailage en béton armé sont très impactant, mais également pour le composant du ciment, qui représente la part la plus émissive pour le béton.

Le cas plus émissif de la maison en béton s'explique notamment par la phase de construction, où les processus ne sont pas les mêmes. Malgré les procédés de traitement autoclave pour les bois résineux pour lui rendre imputrescible, la séquestration du carbone biogénique est un moyen qui permet de compenser, voire d'éviter les émissions de CO<sub>2</sub> tout au long du cycle de vie du bois.

### **3.1.8 Conclusion**

L'étude comparative des maisons individuelles, des immeubles de logement, et des matériaux béton - bois a permis dans ce chapitre de mettre en évidence le surcoût environnemental existant en milieu insulaire. Les données ont été issues d'inventaire régionalisé et en tenant compte des pratiques de construction locale. Ce chapitre démontre l'intérêt et l'importance de considérer des données régionales et non des données génériques ou universelles, qui ne sont pas applicables à tous les territoires français. Les résultats ont mis en évidence les différences pertinentes entre les systèmes de construction de maisons individuelles évaluées dans deux endroits distincts. Cet écart significatif entre les impacts questionne dès lors de façon inévitable l'applicabilité d'une réglementation environnementale nationale sur notre territoire. Bien que les engagements lors de la COP21 soient d'ordre national, la traduction de ces ambitions nécessitent une évaluation et adaptation judicieuse sur les territoires Outre Mer qui comme nous l'avons montré pour le cas de la réunion est en déficit de qualité environnementale pour une même construction.

**VALORISATION** Ce chapitre a fait l'objet d'un article de revue publié : Ayagapin, L., Praene, J.P (2020). Environmental overcost of single family houses in insular context : a comparative LCA study of Reunion Island and France. Sustainability, 12, 8937 [Ayagapin 2020]

# Approche prospective de l'ACV

---

## Sommaire

<b>4.1</b>	<b>Évaluation du total de cycle de vie d'un bâti</b>	<b>80</b>
4.1.1	Évaluation de l'ensemble du cycle de vie des maisons individuelles	80
4.1.2	Évaluation de l'ensemble du cycle de vie des immeubles	83
<b>4.2</b>	<b>Approche prospective de l'ACV : cadre méthodologique</b>	<b>86</b>
4.2.1	Contexte énergétique de la Réunion	86
4.2.2	Phases considérées	86
4.2.3	Catégories d'impacts utilisées pour cette étude	87
4.2.4	Matériels et méthodes	87
4.2.5	Clustering	88
4.2.6	L'approche prospective	88
4.2.7	Conception de scénarii énergétiques	89
<b>4.3</b>	<b>Résultats et analyses</b>	<b>92</b>
4.3.1	Définition des typologies de maisons individuelles à la Réunion	92
4.3.2	Impact environnemental des matériaux	93
4.3.3	Scénarii énergétiques	94
4.3.4	Effet de décarbonisation du mix électrique	97
4.3.5	Implications politiques et leviers	98
<b>4.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>101</b>

---

**A** TRAVERS ce chapitre, nous allons mettre en évidence l'importance de l'insularité, cette fois-ci lors du fonctionnement des bâtis. En effet, les émissions liées à l'énergie lors du fonctionnement des bâtis impactent à hauteur de 17%, dont 10,9% dans le secteur résidentiel. Pour diminuer ces émissions au sein de ces espaces et répondre aux ambitions écologiques, nous définissons des scénarii de décarbonisation. Nous terminons ce chapitre en indiquant les implications politiques et les leviers qui sont à mettre en oeuvre pour accélérer la décarbonisation ambitieuse de la production du mix électrique local à moyen terme.

## 4.1 Évaluation du total de cycle de vie d'un bâti

### 4.1.1 Évaluation de l'ensemble du cycle de vie des maisons individuelles

#### 4.1.1.1 Total de cycle de vie

Nous évaluons dans ce chapitre le bâtiment dans l'ensemble de son cycle de vie à travers 34 MI et 10 IMM, en faisant un focus sur la phase fonctionnement des bâtis. L'approche holistique du cycle de vie que nous proposons, permet de mobiliser et de réfléchir à des solutions et actions adaptées à chacune des phases considérées.

Dans la littérature, les travaux de Üрге-Vorsatz et al., expliquent que l'application de meilleures pratiques actuelles en matière de technologies à haut rendement énergétique pourrait potentiellement réduire de moitié la demande d'énergie pour le chauffage et la climatisation d'ici 2050 par rapport aux niveaux de 2005. [Üрге-Vorsatz 2012].

En Chine, une étude portant sur la décarbonisation tenant compte à la fois des progrès technologiques et de la transmission interrégionale de l'énergie pour le secteur de l'électricité a été conceptualisée pour explorer le potentiel et la voie possible de la décarbonisation sous la contrainte du coût optimal. Les résultats ont permis de clarifier systématiquement le mécanisme des différents facteurs qui influent sur la consommation d'énergie des bâtiments, ce qui vient aider les ingénieurs et les décideurs à identifier des conceptions et des mesures opérationnelles applicables pour réduire la consommation d'énergie des bâtiments [Li 2021].

D'autres travaux ont montré que dans le cas de la France, malgré les ambitions de la LTECV, il est difficile de traduire aujourd'hui les objectifs et les engagements énergétiques en mesure de politiques spécifiques [Schwarz 2020]. Cette étude a identifié cependant, cinq solutions possibles pour la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de carbone dans le secteur du bâtiment avec :

- l'augmentation de l'efficacité énergétique des bâtiments ;
- l'augmentation de la part d'énergie renouvelable dans le mix électrique ;
- la prise en compte de l'énergie grise ;
- la réduction de l'écart de performance ;
- et l'accélération des rénovations grâce aux obligations environnementales.

Parmi ces cinq solutions, l'écart de performance vise à réduire la différence entre la consommation d'énergie calculée et mesurée selon [Glasgo 2017, Gupta 2018, Rosenberg 2017]. Cette différence s'élève à 34% en moyenne selon [Van Dronkelaar 2016], mais peut multiplier par trois la consommation d'énergie calculée selon [Delzende 2017]. Cependant, leurs études pourraient être limitée aux pays dont l'environnement bâti est similaire. [Schwarz 2020].

Dans nos travaux, le total de cycle de vie d'un bâti prend en compte les phases structurelle, fonctionnelle et fin de vie. La figure ci-dessous, représente l'évaluation environnementale pour le GWP des 34 maisons individuelles évaluées.  $\text{CO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ .

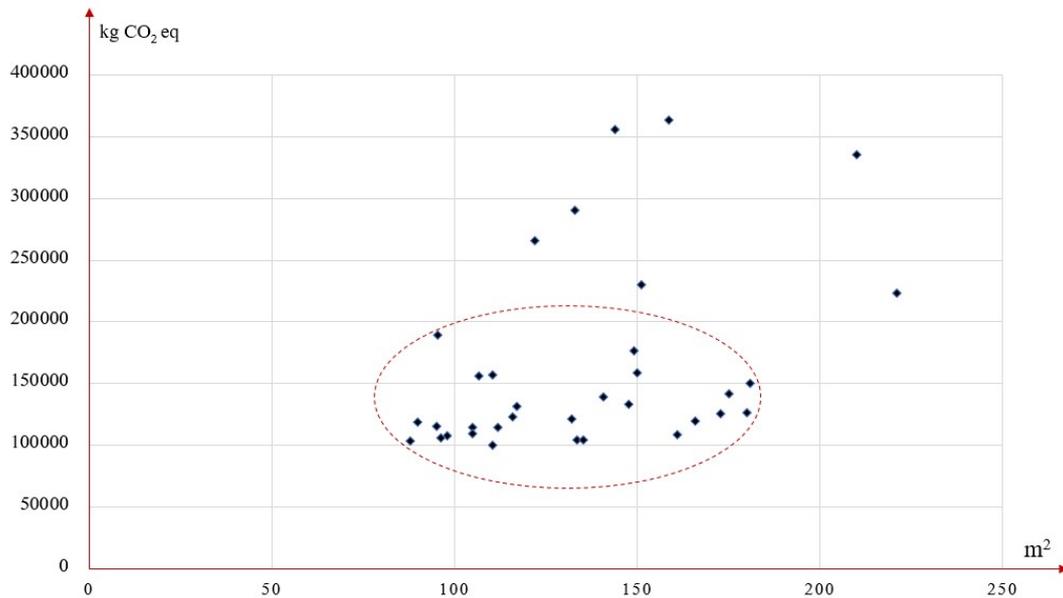


FIGURE 4.1 – Total cycle de vie des 34 maisons individuelles évaluées à la Réunion

Parmi les 34 MI évaluées, nous constatons que les émissions totales pour le GWP varient entre 100 334 et 363 474 kg  $\text{CO}_2\text{eq}$ , comme le montre la figure 4.1. Ces maisons sont situées aussi bien dans les hauts de l'île (supérieur ou égal à 400 m d'altitude) que sur le littoral (inférieur ou égal 400 m). La majorité des maisons construites ayant un impact environnemental compris entre 100 000 et 200 000 kg  $\text{CO}_2\text{eq}$  possèdent une superficie comprise entre 88 et 170 m<sup>2</sup>. Nous soulignons que plus la MI est grande, plus son impact est grand. Ces résultats reflètent l'homogénéité des techniques de construction à la Réunion.

Si nous ramenons ces émissions totales aux ratios, nous notons que le GWP varie entre 2065 et 2868,30 kg  $\text{CO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ . Ces ratios placent le cas de la Réunion dans la moyenne de ce que l'on trouve dans la littérature pour des études de cas équivalents [Hoxha 2017, Kamali 2019].

Nous avons tenté par la suite, de comprendre quels sont les matériaux et produits qui expliquent grandement l'impact de construction de ces maisons. Ainsi, nous avons relevé que ces maisons sont constituées d'environ 40% de béton, de 30 à 35% de blocs américains, d'environ 5 à 10% de tôle galvanisée, d'enduit, et d'isolation. Il est à noter que les autres matériaux et produits, représentent moins de 5% en termes d'impact pour l'ensemble des maisons évaluées voir Figure 4.2. Cela nous donne ainsi une information importante quant aux leviers d'action pour cibler efficacement les points sur lesquels agir afin de diminuer de façon significative l'impact environnemental.

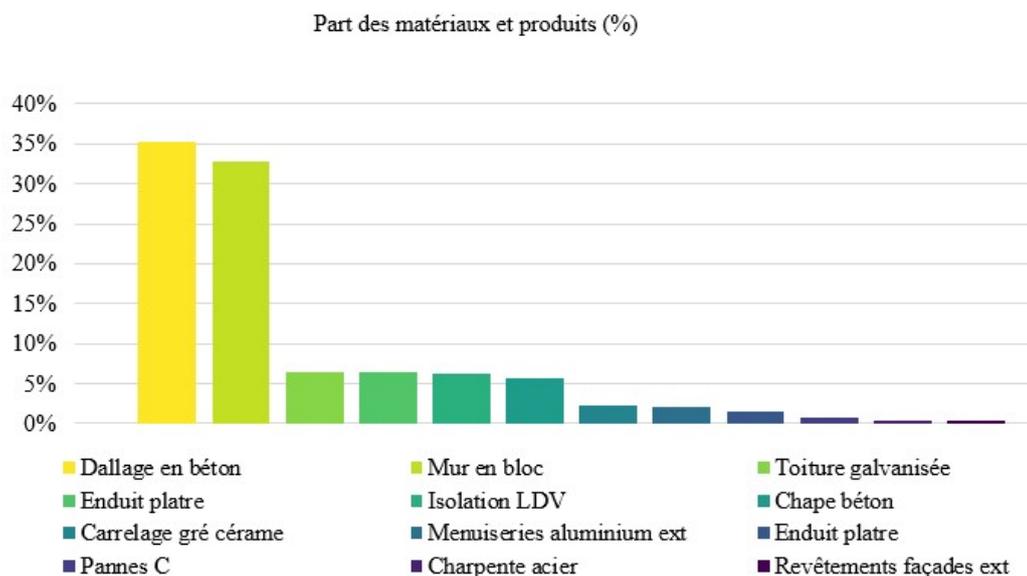


FIGURE 4.2 – Part des matériaux et produits utilisés pour la construction d'une maison individuelle (en %)

Sur l'ensemble des plans de construction répertoriés durant cette thèse, la majorité des maisons individuelles traitées sont construites à partir de béton, de parpaings, d'acier, d'aluminium et de bois. Elles sont également équipées en isolation, en grès cérame, en aluminium, bois ou chlorure de polyvinyle (PVC). La première section du chapitre V, détaillera davantage les matériaux et produits les plus utilisés dans la construction des bâtis à la Réunion, à partir d'une méthodologie innovante, issue de nos travaux, couplant l'ACV à la loi PARETO.

#### 4.1.1.2 Par phase de cycle de vie

Comme le montrent les études d'Endrit Hoxha et al., et d'Ahmad Faiz Abd Rashid et al., lors de l'évaluation de l'impact environnemental des maisons résidentielles, c'est la phase fonctionnelle qui est la plus importante [Hoxha 2017, Abd Rashid 2017].

Dans notre étude, l'évaluation des 34 MI a également souligné que c'est principalement la phase fonctionnelle qui est la plus impactante sur l'ensemble de cycle de vie de ces bâtis. La figure 4.3 met en évidence l'impact de la phase fonctionnelle des bâtis de type maisons individuelles.

Une analyse plus approfondie a été réalisée pour chacune des trois phases, afin d'expliquer les impacts. En y regardant de plus près, la figure 4.3 nous indique qu'en

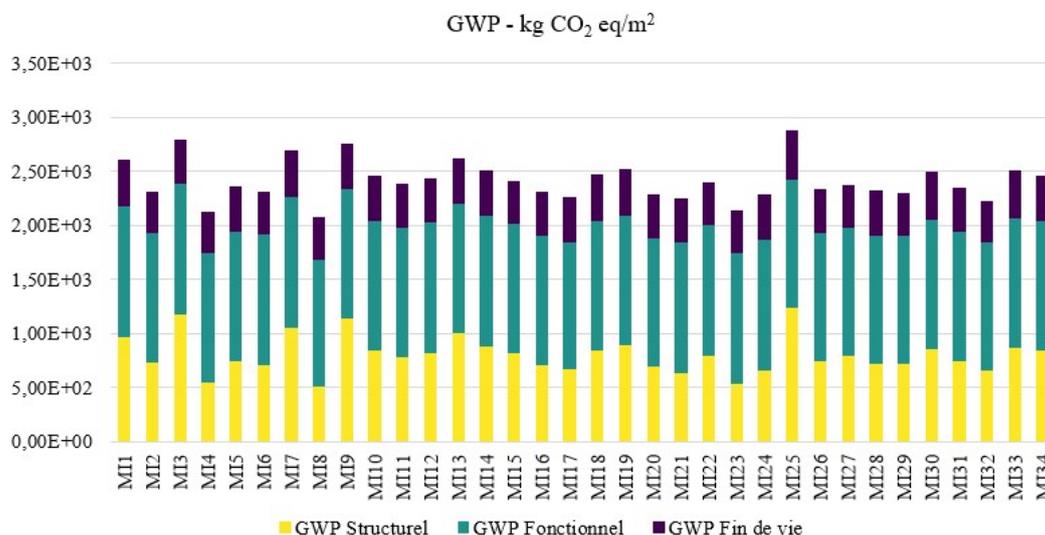


FIGURE 4.3 – Les différentes phases par cycle de vie et par maison

moyenne, la phase structurelle des maisons individuelles à la Réunion impacte à environ :

- 800 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, variant de 500 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> à 1240 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> ;
- en phase fonctionnelle 1200 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, variant de 1100 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> à 1300 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> ;
- et en phase de fin de vie, à environ 400 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, variant de 370 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> à 450 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.

Les ratios moyens pour chacune des phases montrent que la phase fonctionnelle est celle qui a le plus de poids. En phase structurelle, nous avons mis en évidence dans le chapitre III, qu'il existe un surcoût environnemental en milieu tropical insulaire et nous avons proposer différentes solutions pour faire face à une diminution des impacts environnementaux. En phase fonctionnelle, nous proposons ici de quantifier l'impact de la décarbonisation de la production du mix électrique, toujours dans l'optique d'une diminution des impacts environnementaux concernant les espaces bâtis.

## 4.1.2 Évaluation de l'ensemble du cycle de vie des immeubles

### 4.1.2.1 Total cycle de vie

La construction des immeubles à la Réunion a les mêmes bases que celles des maisons individuelles. Nous retrouvons l'utilisation des matériaux de construction et produits tels que le béton en très grande quantité, l'acier également, l'aluminium, et le bois, surtout en revêtement extérieur des immeubles. Comme nous le montre la figure 4.4, le ratio moyen d'un immeuble de logement résidentiel est de

47 506,30 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> par an en moyenne. Parmi les premiers résultats obtenus pour ces immeubles, nous constatons que les ratios varient entre 28 800 et 65 040 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. Si l'on ramène au logement individuel, nous sommes en moyenne à 1000 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. Ces ratios et émissions totales peuvent varier en fonction de plusieurs critères :

- le nombre de logements - 20 ou 60 logements ;
- le choix des finitions extérieures - finition en bois ou en acrylique ou en fibrociment : ici, nous notons que les facteurs d'émissions ne sont pas les mêmes, c'est-à-dire qu'en fonction du choix du produit, chacun d'entre eux possède un FE différent les uns des autres ;
- parking sous-terrain - fouille et travaux supplémentaires ou parking au rez-de-chaussée uniquement et autres types de critères.

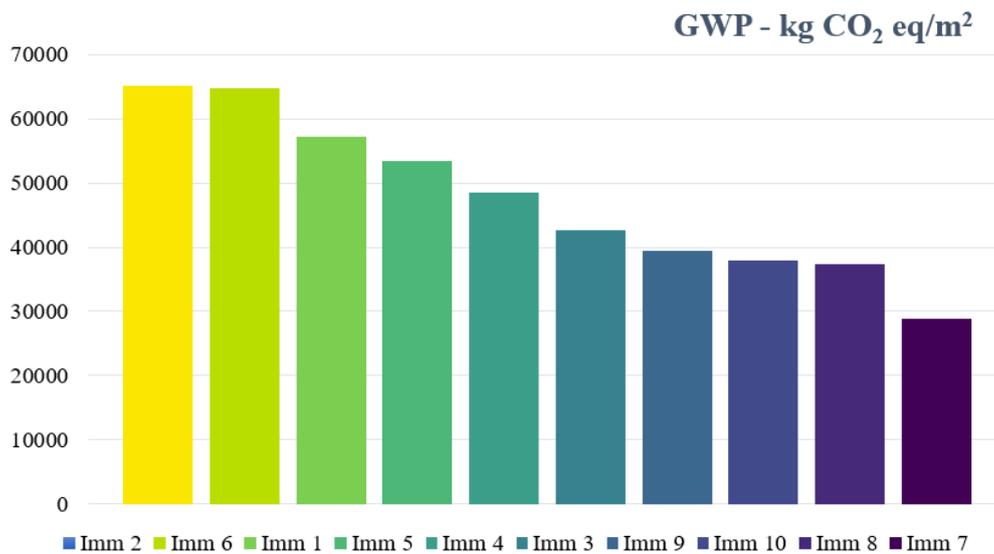


FIGURE 4.4 – Total cycle de vie de 10 immeubles de logements résidentiels évalués à la Réunion

Comme dans le cas des maisons individuelles, ces immeubles sont constitués majoritairement de béton et d'acier (à plus de 70%). A la Réunion, le béton représente 40% de l'impact total d'un bâti. L'étude de Michele Morales a montré également que l'impact total de la construction en milieu insulaire engendre un surcoût environnemental comparé aux territoires continentaux, d'où la nécessité selon lui de régionaliser les données pour les cas éloignés tels que le nôtre [Morales 2019].

## 4.1.2.2 Par phase de cycle de vie

Lorsque nous analysons les résultats par phase de cycle de vie, nous constatons qu'en phase structurelle, on obtient un ratio moyen de 1 888 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, voir figure 4.5. Ces ratios varient entre 600 et 3 700 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, en fonction des immeubles étudiés et évalués. En phase fonctionnelle, les immeubles obtiennent un ratio moyen de 44 982 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. Les critères pris en compte pour l'impact moyen de la phase fonctionnelle ont été : l'émission en CO<sub>2</sub> par usager, l'impact de l'électricité, de l'eau, des matériaux et de la production des déchets qui ont été multipliés par la quantité de logements pour chacun des immeubles. Ces impacts peuvent varier entre 27 370 et 61 880 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> par an. Enfin, en phase de fin de vie, le ratio d'un logement est de 600 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> en moyenne. Ainsi, ces ratios peuvent varier de 400 à plus de 900 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> pour un logement résidentiel 4.5.

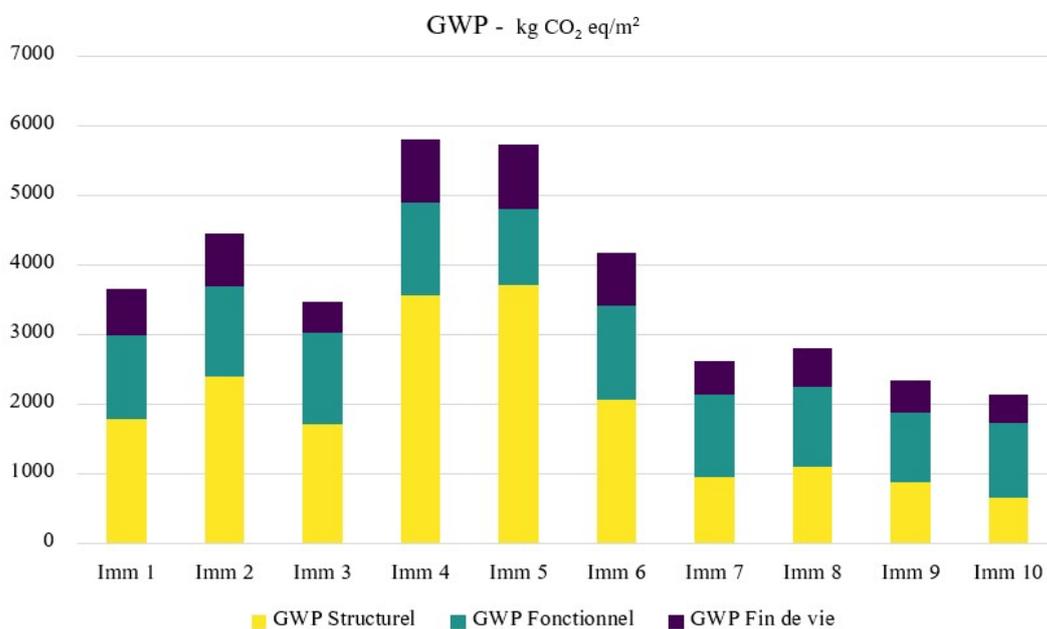


FIGURE 4.5 – Les différentes phases par cycle de vie et par immeuble

## 4.2 Approche prospective de l'ACV : cadre méthodologique

### 4.2.1 Contexte énergétique de la Réunion

De part sa situation insulaire, l'île est totalement dépendante en termes de ressources et de technologies pour sa production d'électricité. Les petites îles ont comme caractéristique commune une forte dépendance à l'égard de ces ressources fossiles importées [Lee 2020]. La Réunion, comme la plupart des économies insulaires a une production d'électricité qui est fortement carbonée. Cependant, l'île a défini depuis près de 20 ans la volonté d'atteindre l'autosuffisance énergétique à l'horizon 2030.

Au début des années 2000, il y a eu une politique régionale volontariste visant la pénétration des énergies renouvelables dans le mix électrique. Cette volonté d'autonomie énergétique a été la traduction d'une intention politique exprimée dans le "Plan immédiat de survie" de 1975, qui a été défini par le parti communiste réunionnais [PCR 1975]. Le PRERURE (Plan Régional des Énergies Renouvelables et de l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie) a été mis en place, puis, une feuille de route en 2000 a été prescrite pour atteindre l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre, et de l'autonomie énergétique en 2025.

Nous notons qu'en 10 ans, de 2009 à 2019, la production électrique réunionnaise a augmenté en moyenne de 1,8% chaque année. En 2019, la production d'électricité distribuée sur le réseau a été de 3046,9 GWh et la part des énergies renouvelables représente un peu plus de 31%. Il est à noter que par rapport à d'autres îles, la capacité hydroélectrique de La Réunion a été largement exploitée. Des expériences de micro-centrales hydro-éoliennes ont été menées également dans l'Est de l'île en raison de la complémentarité des deux sources. Cette solution a cependant été rapidement abandonnée en raison de sa faible rentabilité.

### 4.2.2 Phases considérées

Dans ce chapitre, le périmètre pris en compte pour l'évaluation des bâtis est celui du berceau à la fin de vie, en faisant un focus sur la décarbonisation du mix électrique dans le secteur du bâtiment lors de la phase fonctionnelle. Les maisons retenues ont été construites entre 2010 et 2020 selon la RTAADROM [RTAADROM 2016].

Le périmètre d'étude comprend :

- la production - approvisionnement en matières premières, transport, fabrication ;
- la construction - transport, processus d'installation ;
- l'utilisation - évolution de la production et de la consommation du mix électrique local.

TABLE 4.1 – Indicateurs utilisés pour l'étude environnementale des bâtis

Indicateurs	Unité
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq
AP	kg SO <sub>2</sub> eq
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq
ODP	kg CFC-11
ADP-E	kg Sb eq
ADP-F	MJ
SRM	kg

sur une période allant de 2010 à 2040.

### 4.2.3 Catégories d'impacts utilisées pour cette étude

Les indicateurs utilisés dans ce chapitre IV sont répertoriés dans le Tableau 4.1.

### 4.2.4 Matériels et méthodes

Dans cette section, le cadre utilisé pour modéliser et analyser la décarbonisation est présenté ci-dessous. Sur la base de différentes phases de modélisation décrites, la figure 4.6 récapitule le cadre global de ces travaux.

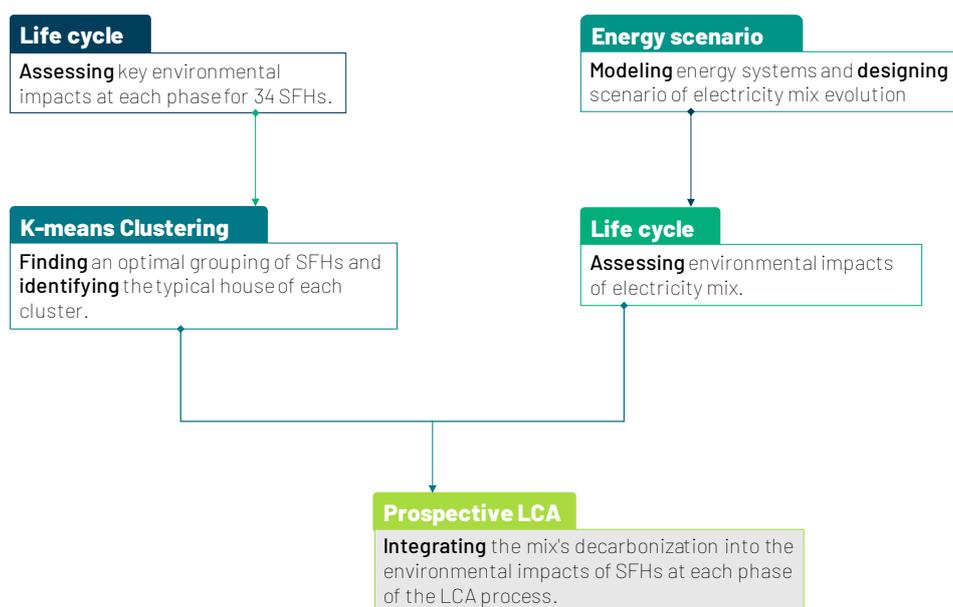


FIGURE 4.6 – Synoptique de la méthodologie globale

Pour faciliter l'analyse, un clustering définit les maisons typiques de l'île de la Réunion, pour garder ainsi les maisons les plus représentatives, qui sont au nombre de 3, comme nous l'indique l'analyse du cluster à la figure 4.8. La surface des 3 maisons étudiées est respectivement de 110,3 – 106 et 90 m<sup>2</sup> SHON. Puis, des scénarios énergétiques ont été développés pour modéliser les voies de décarbonisation du mix électrique. Enfin, l'évolution du mix est intégrée dans l'ACV des maisons types.

### 4.2.5 Clustering

L'analyse en composante principale (ACP) est une méthode statistique largement utilisée pour réduire la dimension d'un ensemble de données [Sharma 1996]. Ainsi, l'ACP est basée sur l'hypothèse que seules certaines variables sont indépendantes, les autres peuvent être déduites les unes des autres [Ndiaye 2011]. L'ACP est alors appliquée aux 7 indicateurs utilisés dans ce chapitre, dans les trois phases et au comptage des évaluations, soit un total de 21 variables. Cette méthode nous permet de créer de nouvelles dimensions appelées composantes principales qui sont des fonctions linéaires des variables les plus significatives du jeu de données initiales.

L'inertie est utilisée comme mesure de la variabilité inter et intra-classe dans cette fonction. Dans la mise en œuvre du clustering, la méthode des K-means est l'une des méthodes de partitionnement les plus utilisées. Ainsi, dans cette méthode, le cluster est représenté par son centre de gravité. L'objectif principal de cette technique est de réduire la variation totale au sein du cluster [MacQueen 1967] selon l'équation 4.1 :

$$I_a + I_b = I_{a \cup b} - \frac{m_a m_b}{m_a + m_b} d^2(a, b) \quad (4.1)$$

Où,

I désigne l'inertie

$m_a$  et  $m_b$  représentent le nombre de maisons dans les clusters a et b, respectivement, et  $d^2(a, b)$  est la distance au carré entre leur centre de gravité.

L'inertie est réduite lorsque les deux clusters sont groupés par une valeur proportionnelle à la distance des clusters. Le nombre d'individus dans chaque classe est le poids. Toutes les analyses statistiques et le clustering ont été réalisés à l'aide du package FactorMineR [Husson 2016]. L'optimisation du nombre de clusters a été réalisée en utilisant la méthode statistique plutôt qu'une métrique globale, comme la méthode du coude ou de la méthode silhouette [Tibshirani 2001].

### 4.2.6 L'approche prospective

La prospective est une approche qui permet de visualiser des futurs possibles par la mise en œuvre de scénarios. Depuis plus de cinquante ans, cette démarche est dé-

veloppée en France afin de définir quelles trajectoires économiques devaient prendre le territoire. Cette approche peut être soit qualitative ou quantitative, en mobilisant des environnements de modélisation de scénario.

La prospective ne doit pas être vue comme étant un outil prophétique qui impose un futur, mais plutôt comme un outil qui nous aide à bâtir le futur, qui nous éclaire sans aucune prédétermination, contrairement aux approches de type Business-As-Usual (BAU).

Dans le domaine de la prospective quantitative, la modélisation repose principalement sur deux grandes approches :

- Les modèles "top-down", où la stratégie est mise en avant. En effet, dans cette approche, l'objectif énergétique est de considérer une contrainte placée au plus haut niveau hiérarchique. Ainsi, on s'attache à définir les corrélations avec les branches inférieures de cet arbre hiérarchique. L'objectif est de prendre une décision qui trouve une déclinaison dans une forme ou une autre, auprès de tous les acteurs de la transition énergétique ;
- Et les modèles "bottom-up", où on est plutôt dans la construction d'un modèle à partir d'un ensemble de paramètres du système. On parle ici de "processus", qui permet d'avoir une représentation complexe de la production électrique. Cela permet alors de développer des problématiques d'optimisation des réseaux, de la production et de la demande.

Dans le cadre de ces travaux, l'approche prospective à partir du « bottom-up » nous a permis de construire des scénarios pour la Réunion, et ce, à partir du logiciel OSEMOSYS que nous présenterons dans la partie ci-après.

#### 4.2.7 Conception de scénarii énergétiques

Dans ces travaux, l'outil de modélisation énergétique OSEMOSYS est utilisé pour concevoir des scénarios énergétiques pour l'île de la Réunion afin de déterminer l'évolution des énergies renouvelables dans le mix électrique. La méthode de modélisation OSEMOSYS a alors été mise en œuvre dans de nombreuses régions pour façonner le futur réseau énergétique.

En Amérique du Sud, Moura et al., [de Moura 2018] ont construit la South America Model Base (SAMBA). Ils ont conclu suite à leurs travaux que l'investissement dans des centrales hydroélectriques massives et les échanges entre les pays peuvent constituer une alternative viable pour réduire le coût des émissions et de la production d'électricité.

A travers le modèle The Electricity Model Base for Africa (TEMBA), Taliotis et al., ont modélisé quant à eux, un total de 47 pays continentaux, et ils ont considérés les liaisons de transmission entre eux. Leur conclusion suggère qu'investir dans

des liaisons de transmission transfrontalières pourrait théoriquement modifier l'environnement énergétique africain et réduire significativement les coûts de production d'énergie [Taliotis 2016].

OSeMOSYS, qui est une architecture hautement adaptable et évolutive pour l'optimisation des systèmes énergétiques, est alors conçu comme un programme linéaire qui détermine les investissements technologiques optimaux en matière d'énergie et les programmes de répartition afin d'optimiser les coûts. A contrario de nombreuses autres plateformes de modélisation d'énergie, OSeMOSYS est un logiciel libre. Enfin, il faut savoir qu'une implémentation d'OSeMOSYS est composée de "blocs" distincts de fonctionnalités qui correspondent aux différents composants de la structure modélisée. Avant l'exercice de prospective, il est important et nécessaire de définir le système énergétique de référence. L'objectif est alors de représenter les différentes sources de production pour l'année de référence.

La figure 4.7 présente le détail des processus et des ressources qui ont été mis en œuvre dans OSeMOSYS pour le modèle open Source Base de l'île de la Réunion, appelé SARI.

Nous avons élaboré la structure de ce modèle en tenant compte de la structure de la demande, mais aussi des technologies de production d'énergie et des aspects économiques, techniques et environnementaux associés. Ainsi, les scénarios présentés ci-dessous ont été créés :

- BAU (Business As Usual) : ce scénario illustre la situation actuelle du territoire réunionnais qui nous sert en quelque sorte de scénario de référence. Il n'y a pas d'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix. Nous notons également que la production d'énergie hydraulique, photovoltaïque et éolienne reste constante. Ce scénario représente ainsi une extrapolation tendancielle ;
- SCENARII : tout d'abord, le charbon est abandonné au profit du Green Pulp, et une diminution progressive des centrales HFO - fondées sur des moteurs consommant du fioul lourd est modélisée jusqu'en 2029.

L'un des points importants est l'intégration de la valorisation des déchets sous plusieurs formes dans les hypothèses de scénarios. En effet, bien que le potentiel est prometteur depuis de nombreuses années, les filières associées ont été peu étudiées et exploitées localement. Le premier aspect existant qui est développé est le biogaz, qui est issu des décharges, malgré la faible disponibilité de terrains pour les nouvelles décharges.

Un deuxième aspect concerne alors l'incinération des déchets solides municipaux (MSW) et la gazéification, qui, pour le moment, est encore en phase expérimentale sur l'île [Selosse 2018, Audouin 2016].

Enfin, l'énergie géothermique, qui a été négligée depuis longtemps, est à nouveau abordée dans les plans. La technologie géothermique a été intégrée dans le scénario en fonction de la possibilité d'une première installation.

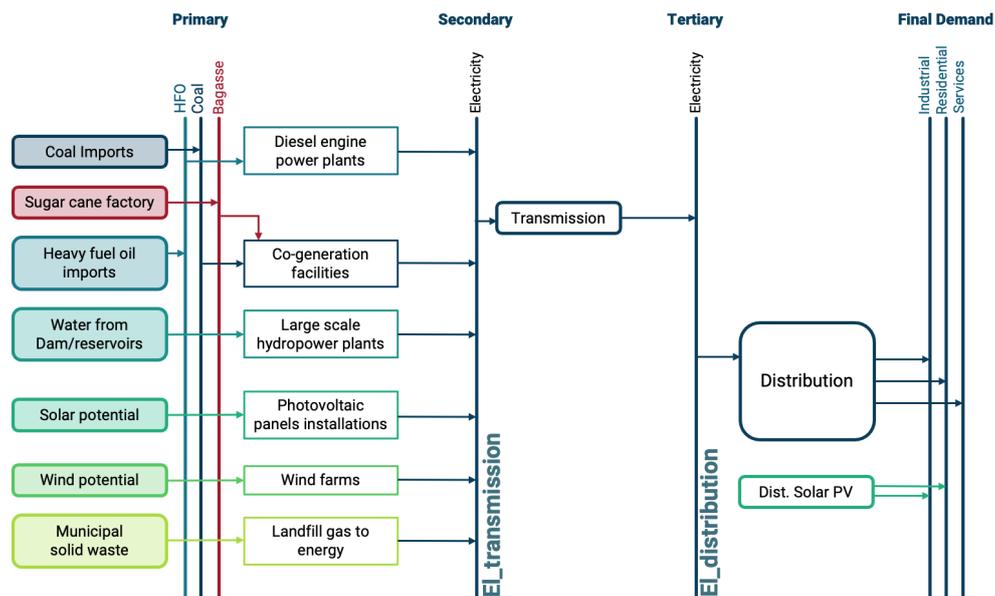


FIGURE 4.7 – Système énergétique de référence SARI

Dans nos travaux, un modèle de production optimal d'électricité avec une source renouvelable virtuelle est modélisé. La méthode est basée sur une recherche séquentielle d'une technologie d'énergie de sauvegarde avec un impact environnemental nul et des coûts nuls appelé "Backstop". Le processus d'optimisation favorise ainsi le backstop dont l'impact environnemental et les coûts sont nuls pour répondre à la demande d'électricité. Puis, dans un deuxième temps, le mix de ce backstop est défini par le potentiel de production renouvelable.

Dans le cadre de sa planification énergétique, l'île de la Réunion a d'abord prioriser le panneau photovoltaïque (PV)/ éolien et l'énergie de traitement des déchets (ETD). Ainsi, nous avons établi le complément d'énergie généré par le backstop, puis nous avons détaillé comment ce mix serait mis en œuvre dans les futures installations prévues. Cela inclut l'intégration de deux unités de valorisation énergétique (UVE), la conversion de l'énergie thermique des océans (OTEC), des systèmes de gazéification, l'énergie géothermique et enfin l'utilisation de green pulp (biomasse) à la place du charbon d'ici 2025. Ces ressources représentent des potentiels qui n'ont été que peu, voire pas du tout exploités jusqu'à présent à la Réunion.

## 4.3 Résultats et analyses

### 4.3.1 Définition des typologies de maisons individuelles à la Réunion

Une fois les MI réunionnaises évaluées et analysées, nous avons décidé d'approfondir les travaux, en tentant de définir l'existence d'une ou plusieurs typologies de bâtis à la Réunion. Pour ce faire, une Analyse en Composante Principale (ACP) a été réalisée sur une matrice de 34 MI, définie par 21 indicateurs d'ACV, en utilisant la méthodologie décrite dans la section 4.2.5 où nous présentons le Clustering. L'inertie des axes factoriels suggère que les deux premiers axes de l'ACP expriment 46,3% de l'inertie totale de l'ensemble des données. Cette valeur est supérieure à la valeur de référence de 26,81%, indiquant que ce premier plan de projection explique une grande partie de la variabilité contenue dans la base de données initiale. Selon Kaiser, on retient les composantes principales dont la valeur propre  $\lambda > 1$ , Kaiser1961.

Ce clustering est réalisé soit sur le tableau de données brutes, soit sur des objets sélectionnés. Notre processus commence par la réalisation d'une ACP puis d'un clustering en utilisant les coordonnées des individus à savoir les MI. L'ACP ne peut retenir que les dimensions les plus significatives pour notre étude. Ainsi, les points désignant les maisons individuelles sont initialement projetés sur le plan défini par les deux premières dimensions de l'ACP. Ils sont ensuite regroupés, puisque les distances entre les points par rapport au plan principal varient. Les deux points projetés proches ne sont pas intrinsèquement proches. De facto, la superposition des projections des clusters n'implique pas que ces clusters se chevauchent. Le fait que leurs projections sur le plan principal se chevauchent, n'implique cependant pas qu'un individu puisse appartenir à plus d'une classe. Le principe de partitionnement des K-means exige qu'un individu n'appartient qu'à une seule classe.

La Figure 4.8 montre les résultats du clustering projeté sur les deux premières composantes principales. Les résultats ont révélé trois clusters distincts avec des caractéristiques différentes. L'analyse des clusters s'est effectuée en deux étapes : d'abord pour les variables, puis pour les individus - maisons individuelles. Les variables catégorielles associées à chaque cluster les caractérisent. Une p-value, qui est un test de statistique descriptive, est ici utilisée pour classer ces variables. L'objectif de notre classification a été de définir des typologies de construction en fonction de la qualité de l'environnement et non pas de caractériser chaque individu selon les variables.

Le processus de regroupement implique l'identification des parangons. L'individu avec les coordonnées les plus proches du barycentre pour chaque groupe est appelé le parangon, et son profil caractérise le mieux le cluster auquel il appartient i.e. il représente le comportement moyen de l'ensemble du cluster.

Ces parangons, évitent de traiter l'ensemble des 34 maisons dans notre analyse

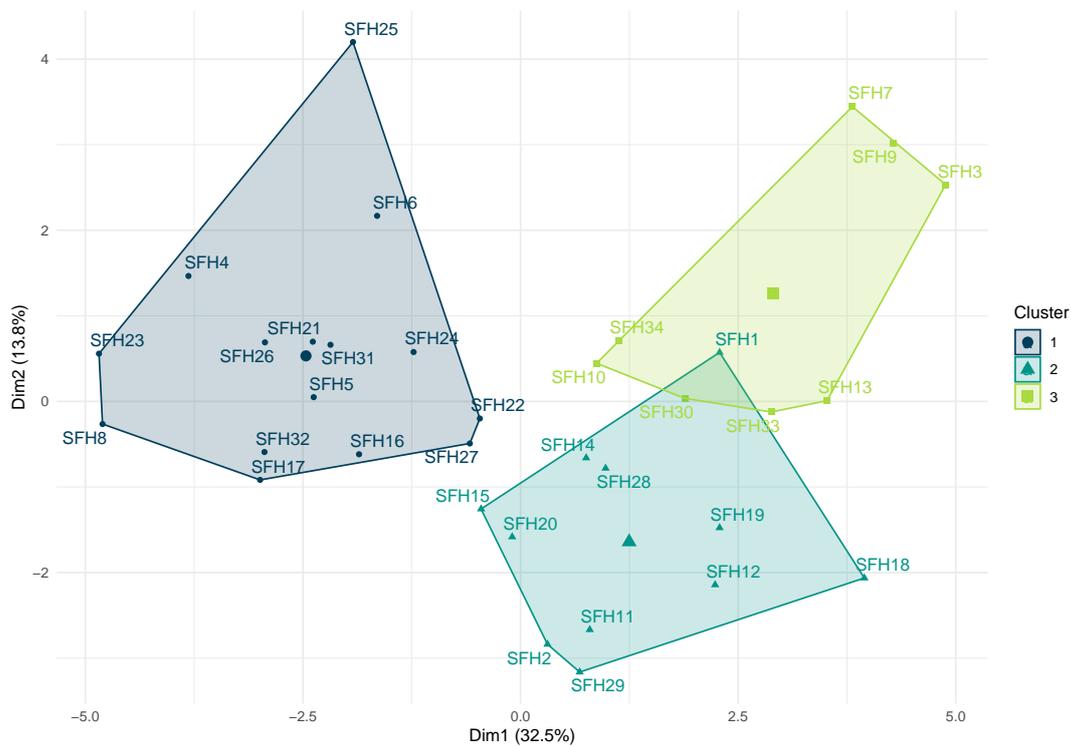


FIGURE 4.8 – Résultats des clusters pour la définition de la typologie des maisons projetés sur les deux premières composantes principales

mais se concentrent sur trois d'entre elles qui sont représentatives de l'ensemble de la base de données. Ces parangons sont principalement illustrés par : la maison 16 (SFH16)<sup>1</sup> pour le cluster 1, la maison 12 (SFH12) – pour le cluster 2, et la maison 13 (SFH13) – pour le cluster 3. La maison 16 représente un groupe à faible impact environnemental dans toutes les phases de cycle de vie, tandis que la maison 12 représente les caractéristiques d'un groupe à faible impact en termes d'appauvrissement de la couche d'ozone mais a des valeurs élevées sur les matières premières secondaires, et l'ADP-E dans les phases structurelles et fin de vie. Enfin, la maison 13 synthétise les caractéristiques d'un groupe fortement marqué par un PRP (potentiel de réchauffement planétaire) dans la phase structurelle et un potentiel d'acidification élevé tout au long du cycle de vie.

#### 4.3.2 Impact environnemental des matériaux

La forte proportion de béton dans certaines maisons individuelles explique l'effet structurel important, e.g - les fondations en béton, la dalle en béton, et la chape en

1. SFH (Single Family House) représente les MI (maisons individuelles)

béton. Les châssis et façades, ainsi que la généralisation des menuiseries en aluminium - portes, fenêtres, jalousies, baie vitrée, volet roulant ont également une forte proportion. Pour une dalle en béton et un volet roulant motorisé en aluminium, le facteur d'émission régionalisé est respectivement de 187 et 623 kg CO<sub>2</sub>eq.

En revanche, pour la phase fonctionnelle, la production du mix électrique local et l'impact de la consommation des habitants ont été pris en compte afin de déterminer le ratio moyen de production, soit 0,657 kg CO<sub>2</sub>eq/kWh, et l'impact de la consommation des usagers réunionnais, soit 4,1 kg CO<sub>2</sub>eq/habitant. Ces chiffres nous ont permis d'obtenir un ratio moyen en phase fonctionnelle pour chacune des maisons étudiées.

Selon l'indicateur choisi, les disparités peuvent ou non être marquées comme le montre la Figure 4.9.

Les indicateurs de matières premières secondaires (SRM) et de l'épuisement des ressources abiotiques - fossiles expliquent en partie l'impact sur les phases structurelle et fonctionnelle pour la maison 16. Cependant, la phase fonctionnelle a un impact beaucoup plus important sur d'autres indicateurs, tels que l'ADP-E, le GWP et l'ODP. La phase de fin de vie reste la phase la moins impactante, malgré sa proportion significative pour l'AP, l'ADP-E et le SRM.

Pour la maison 12, on constate que les indicateurs tels que l'ADP-F, le SRM, l'AP et le GWP ont un impact environnemental relativement important sur l'aspect structurel. Nous notons notamment que l'ADP-F, le GWP et surtout l'ODP ont un impact environnemental conséquent sur l'aspect fonctionnel. Enfin, ce sont principalement l'AP, le SRM et l'EP qui obtiennent un impact plus conséquent pour la phase de fin de vie.

Pour la maison 13, l'impact environnemental de la phase structurelle est plus critique pour l'ADP-F, le SRM et le GWP. La phase fonctionnelle a un impact plus important pour l'ODP, le GWP, l'ADP-F et le SRM. Nous observons que l'ADP-F, le GWP et l'AP ont des impacts notables dans la phase fonctionnelle. Pour le PRG, le charbon est le plus mauvais choix. Trois autres indicateurs, à savoir ADP, EP et ODP, semblent avoir des effets majeurs comme le GWP. La combustion de combustibles explique la majorité des impacts des centrales électriques au charbon et au pétrole. L'ADP, qui est presque entièrement dû à l'extraction du combustible, est une exception. L'effet de production d'électricité à partir de bagasse sur l'AP et l'EP est principalement dû aux scories et aux cendres qui restent après la combustion de la bagasse [Brizmohun 2015]. L'hydroélectricité, quant à elle, n'a qu'un seul impact : la construction des centrales.

### 4.3.3 Scénarii énergétiques

Dans cette partie, nous avons examiné les résultats des scénarios qui ont été évalués à l'aide de paramètres d'optimisation pour chacune des technologies. Notre ap-

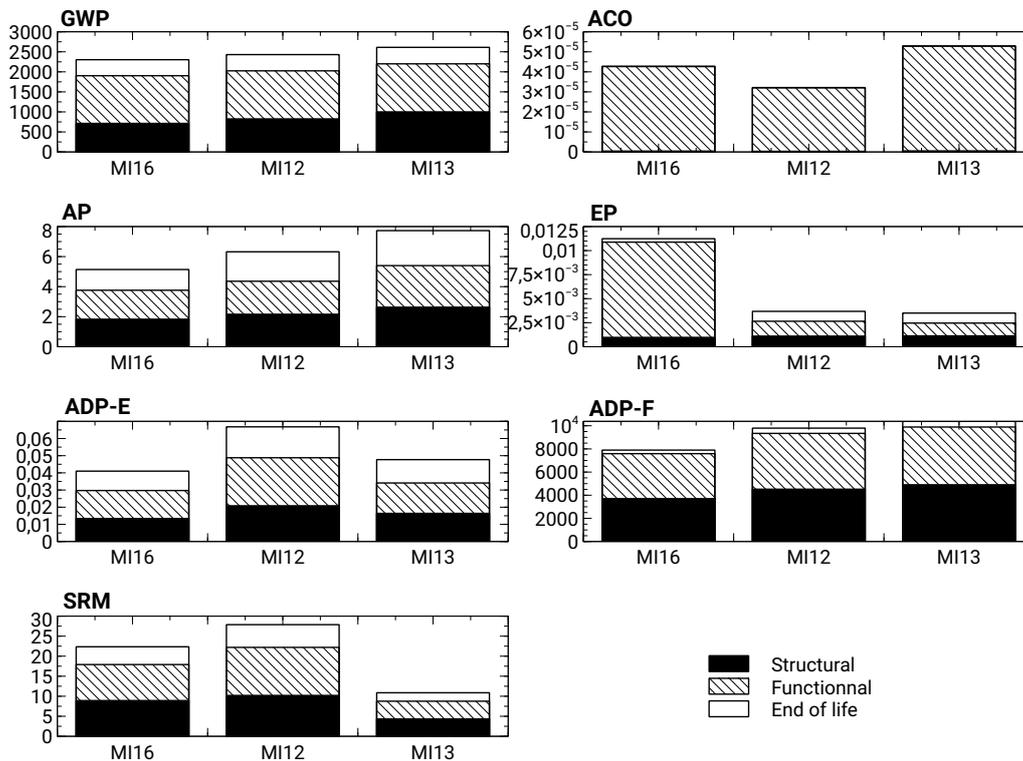


FIGURE 4.9 – Résultats globaux du cycle de vie

proche a consisté à considérer dans le scénario, les technologies disponibles selon l'année de référence 2018.

Ensuite, nous avons intégré les ambitions des politiques de décarbonisation de la production d'électricité. La stratégie se concentre principalement sur l'intention de développer un mix énergétique diversifié capable de sécuriser la production d'énergie.

Ainsi, les objectifs sont d'une part de réduire la vulnérabilité énergétique du territoire, et d'autre part, de contenir la volatilité des prix de l'électricité en limitant la dépendance de l'île aux ressources exogènes. Trois axes principaux sont considérés :

- L'élimination du charbon à court terme ;
- L'augmentation des installations renouvelables historiquement disponibles ;
- Et le développement de nouvelles technologies - Forçage d'un backstop : Technologie virtuelle ;

Pour favoriser l'intégration de nouvelles installations, nous avons créé une ressource énergétique virtuelle dont l'impact économique et environnemental est nul. De cette manière, il est possible de forcer cette technologie backstop à répondre à la

demande en électricité. Une fois cette demande identifiée, nous nous sommes référés aux orientations du plan pluriannuel de l'énergie de la Réunion pour proposer un nouveau mix électrique. Dans ce cas, la production d'électricité à partir de charbon atteindra 1233 GWh de 2018 à 2024, après quoi les centrales à charbon seront progressivement arrêtées à partir de 2025 voir Figure 4.10.

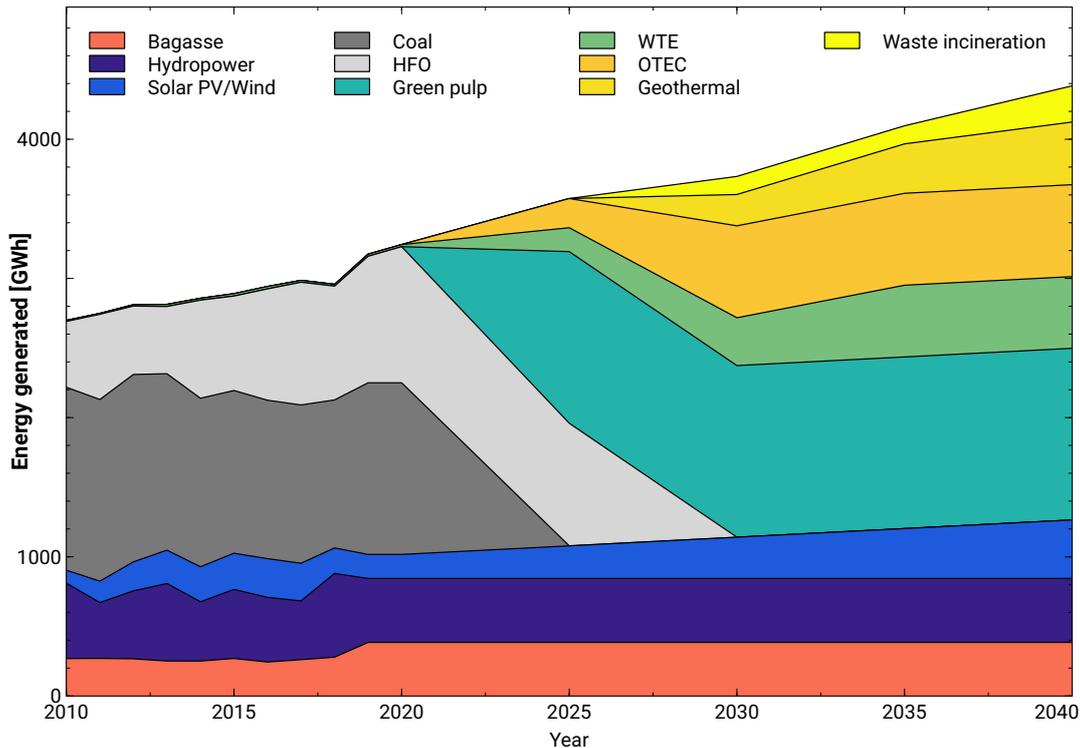


FIGURE 4.10 – Évolution de la production d'électricité de l'île de la Réunion de 2010 à 2040

Le Green Pulp est envisagé pour être utilisé dans le système énergétique local à partir de 2023 en prenant le charbon comme source de combustible de substitution. Dans notre étude, nous avons intégré le Green Pulp à partir de 2025. Pour les années 2025 à 2040, le green pulp génère une quantité constante de 1233 GWh.

Le HFO, quant à lui, montre une tendance à la baisse dans la production d'énergie de 2018 à 2025, représentant 880 GWh en 2029, en raison d'une diminution constante de la capacité. Les centrales électriques alimentées au HFO seront progressivement abandonnées d'ici 2025.

La production d'énergie à partir de la bagasse, de l'énergie hydraulique, du biogaz et des ressources éoliennes reste la même que dans le scénario BAU, car aucune nouvelle installation n'est prévue. En 2040, la part du backstop représente 61,39% du mix global. Cette nouvelle contribution des énergies renouvelables en GWh se répartit comme suit : Green Pulp (1233) – OTEC (660) – Géothermie (450) – Gazéification

(227) – UVE(260). Les projections montrent une réduction de 63,6% des émissions de GES pour le mix électrique, passant de 0,657 kg CO<sub>2</sub>eq/kWh en 2020 à 0,239 en 2040.

#### 4.3.4 Effet de décarbonisation du mix électrique

L'effet de décarbonisation a été mesuré sur les 3 maisons sélectionnées lors de la définition de la typologie. L'effet de décarbonisation a mis en évidence l'évolution de l'impact environnemental des maisons individuelles sur 30 ans, en tenant compte de l'utilisation du mix électrique local pour les phases structurelles, fonctionnelles et de fin de vie. L'accord du Green Deal de l'UE [EU 2019] s'engage à développer le secteur de l'électricité en utilisant principalement des sources d'énergie renouvelable. Cependant, il n'y a pas de consensus international sur la manière de décarboniser le secteur.

Au cours des trois prochaines décennies, la production d'électricité connaîtra un changement structurel important en Europe, où des limites strictes en matière de carbone seront probablement adoptées [Gerbaulet 2019]. En tant que zone ultrapéripériphérique de l'Europe, ces ambitions concernent aussi la Réunion. Cependant, nous notons que la situation initiale n'est pas la même dans toutes les régions d'Europe. En effet, les pays d'Europe de l'Est ont un système de développement fortement dépendant du charbon et du gaz naturel. La situation de la Réunion est particulière puisque le charbon constitue 24,1% de sa production d'électricité. De même que pour les pays d'Europe de l'Est, la préférence pour un mix énergétique stable à faible coût a conduit à la pénétration du charbon dans le mix [Sadik-Zada 2021].

Maintenant que le débat sur l'énergie se déroule également sur le plan écologique, la « question du charbon » n'est pas viable car ses effets impactent d'autres secteurs.

A la Réunion, les centrales thermiques fonctionnent à la bagasse pendant la campagne sucrière, allant de Juillet à Décembre. En dehors de cette période, le charbon est l'unique ressource énergétique.

Pour atteindre son objectif de décarbonisation, la Réunion entend remplacer le charbon par le Green Pulp importée d'Amérique du Sud. Ainsi, l'impact sur l'environnement sera considérablement réduit mais pas éliminé en raison du transport. De plus, la vulnérabilité énergétique du territoire reste inchangée puisque nous continuons à dépendre des importations. Cet approvisionnement pourrait mettre en péril la production d'électricité en l'éventualité d'une crise mondiale *énergétique, sanitaire, économique*.

Par conséquent, cette décarbonisation représente une opportunité importante de réduire les émissions dans le secteur du bâtiment, notamment pendant la phase fonctionnelle du cycle de vie du bâtiment.

Nous constatons que l'impact de la production du mix électrique local a été considéré en 2010 avec un impact environnemental de l'électricité qui a été évalué

à 0,699 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh, puis à 0,657 en 2020, à 0,195 en 2030, et à 0,239 en 2040. La figure 4.11 traduit cette évolution de décarbonisation de 2010 à 2040, figure 4.11

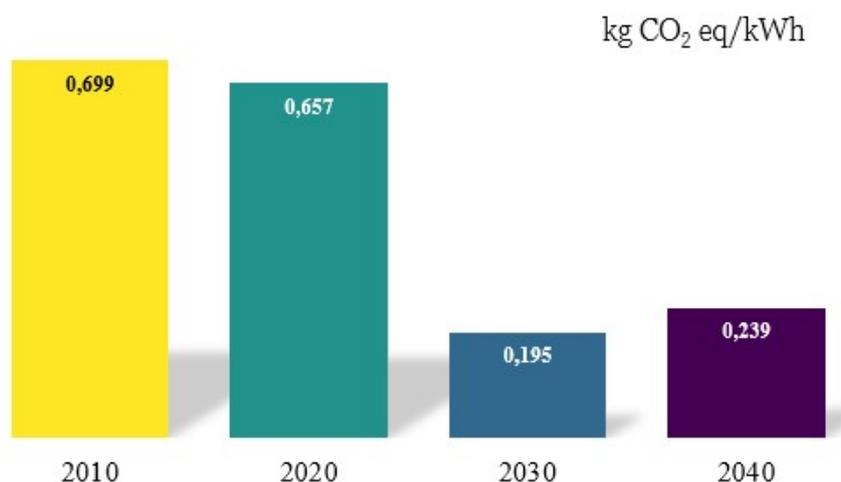


FIGURE 4.11 – Résultats globaux du cycle de vie en tenant compte de la décarbonisation

L'effet de décarbonisation a commencé en 2020, mais devient plus prononcé en 2025, grâce à l'utilisation de nouvelles technologies disponibles sur le territoire réunionnais. La décarbonisation du mix électrique local a diminué, l'impact environnemental total des 3 maisons étudiées de 45%. En regardant de plus près, cette décarbonisation a diminué l'impact structurel de 2%, l'impact fonctionnel de 80% et l'impact de fin de vie de 1%. L'utilisation du mix électrique local dans les phases structurelles et de fin de vie reste alors très minime pour l'indicateur du GWP 4.13. Lorsque nous regardons les autres indicateurs, nous constatons que la diminution des impacts varie d'un indicateur à l'autre et selon les différentes phases 4.12.

### 4.3.5 Implications politiques et leviers

A la Réunion, la majorité des marchandises est importée. Les matériaux et les biens sont extraits et fabriqués dans des pays étrangers en utilisant leur électricité locale. Le mix électrique local n'est utilisé dans le processus structurel que lorsque des matériaux ou produits sont semi-finis, demandant à être assemblés avant d'être expédiés sur les sites d'installation.

Peu de produits (moins de 37% sont recyclés localement en fin de vie). Le reste est soit exporté pour être traité et recyclé à l'étranger, soit considéré comme un déchet final dans un centre d'enfouissement. Cette réduction d'impact est due à la décarbonisation du mix électrique local, qui a l'impact le plus significatif par rapport à l'impact

	STRUCTURELLE	FONCTIONNELLE	FIN DE VIE
GWP	● ++	● +++	● +
ACO	● +	● +++	● +
AP	● ++	● +++	● +
EP	● ++	● +++	● +
ADP-E	● ++	● +++	● ++
ADP-F	● +++	● +++	● ++
SRM	● +++	● +++	● ++

FIGURE 4.12 – Impact de diminution par indicateur et par phases

de l'utilisation des matériaux/ produits, la qualité de l'eau et les déchets ménagers. Cependant, pour réduire les impacts environnementaux des maisons, plusieurs solutions pour l'île sont possibles selon les phases.

A l'échelle locale, une importation moins massive de matériaux et de produits peut être envisagée dans la phase du gros œuvre. Cependant, le gisement local peut être envisagé, mais il ne répondra qu'à une infime partie des problèmes d'importations sur notre territoire qui est dépendant de 80% de l'extérieur actuellement. Puis, la réutilisation des matières premières secondaires doit être privilégiée, dans le but de limiter l'extraction de matières premières dans les pays étrangers. Cette pratique aura également des effets environnementaux (moins de CO<sub>2</sub>), sociaux (création d'emplois locaux), et économiques - équilibre entre l'offre et la demande sur le marché insulaire pour les aspects environnementaux. Sur l'île, des matériaux et des biens spécifiques pourront être directement transformés. Il sera également essentiel de reconsidérer les chaînes d'approvisionnement en contenu et en produits en les important des pays voisins.

Pour l'aspect fonctionnel, il sera essentiel d'opérer principalement au niveau local : le mix électrique réunionnais étant fortement carboné (64% d'énergie fossile

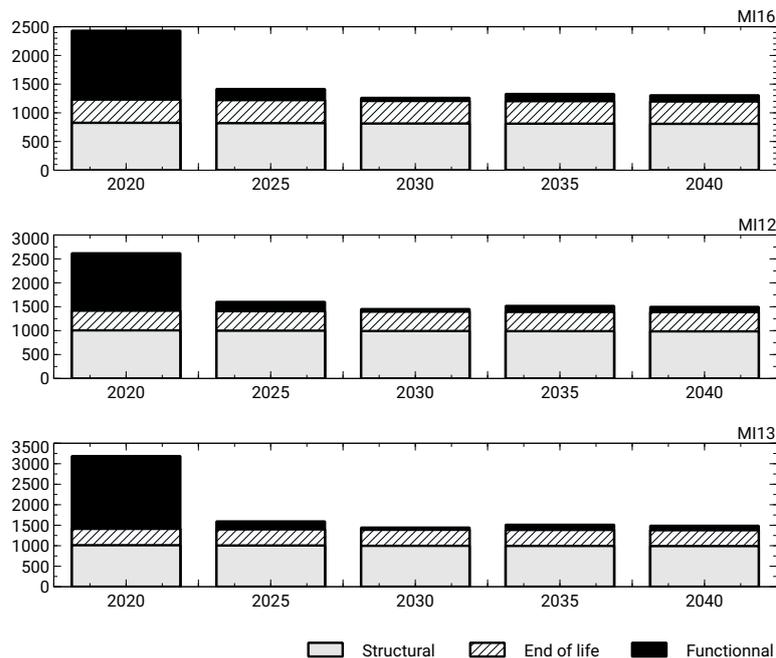


FIGURE 4.13 – Évolution de l'impact du mix électrique entre 2010 et 2040 - GWP - kg CO<sub>2</sub> eq

actuellement), les considérations de décarbonisation sont essentielles. Les scénarios de décarbonisation présentés dans ces travaux montrent qu'à l'horizon 2040, l'utilisation de technologies émergentes permettrait aux maisons réunionnaises d'avoir un effet fonctionnel nettement inférieur. En effet, une perspective prometteuse localement est la valorisation des ordures ménagères résiduelles (OMR). La méthanisation et la gazéification ont été étudiées dans un scénario visant à produire de l'électricité à partir de déchets ménagers. Enfin, un troisième levier qui peut être considéré localement pour réduire les impacts sur la phase fonctionnelle est la minimisation de la consommation d'électricité par la gestion de l'énergie en tenant compte de l'évolution de la consommation d'électricité : le Business- As- Usual (BAU).

Enfin, en ce qui concerne le processus de fin de vie des maisons, la déconstruction des maisons peut être moins impactante en 2040 qu'aujourd'hui en raison de la décarbonisation. Cependant, étant donné que la plupart des matériaux et produits sont enterrés ou expédiés dans d'autres pays à la fin de leur vie, les effets d'une réduction du bouquet énergétique seraient minimes dans ce processus final. L'exportation de matériaux et produits souligne l'incapacité de l'île à traiter les déchets de ses maisons en fin de vie, en raison du manque d'infrastructures, de la méfiance des artisans et aussi de la perception de la population réunionnaise face à l'utilisation des matériaux recyclés, malgré un coût initial divisé par deux dans la plupart des cas.

Enfin, l'effet de décarbonisation sur le secteur de la construction ne fait aucun

doute. Cependant, cette décarbonisation doit être considérée en terme de vulnérabilité, les ressources en biomasse étant délocalisées pour remplacer le charbon.

## 4.4 Conclusion

Nous avons pu observer à travers le chapitre précédent, que la Réunion est un territoire vulnérable, en mettant clairement en évidence le surcoût environnemental de la construction des bâtis. Dans ce chapitre, nous avons montré que notre île est vulnérable, mais cette fois-ci, non pas lors de construction mais lors du fonctionnement des bâtis. L'île est totalement dépendante de la production de son mix électrique de part son caractère insulaire qui lui confère une certaine vulnérabilité. Lorsque nous avons évalué le fonctionnement des bâtis, nous avons souligné le fait que l'électricité locale représentait une grande part dans l'impact du fonctionnement de ces derniers. C'est pourquoi, nous nous sommes penchés ici sur la décarbonisation de notre mix électrique à horizon 2040. Les technologies intégrées ont été choisies en tenant compte du potentiel de l'île, de ses contraintes ainsi qu'au capacité de chacune de ces technologies. Ainsi, nous avons pu déduire qu'il y a également la possibilité de réduire les impacts environnementaux à échelle locale, en remplaçant à moyen terme le charbon par la biomasse et à renforcer quelques technologies sur les prochaines années à venir, comme indiqué à travers nos scénarii. Ces choix permettront d'agir localement sur la diminution des impacts.

**VALORISATION** - Ce chapitre a fait l'objet d'un article de revue publié : Ayagapin, L., Praene, J.P., Jaggeshar, D., Surroop, D. (2021). Prospective Life Cycle Assessment : Effect of Electricity Decarbonization in Building Sector. *Energies*, 14 (11), 3184 [Ayagapin 2021].



# Approches simplifiée et synthétique de l'ACV

---

## Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Modèles environnementaux réduits</b> . . . . .	<b>104</b>
5.1.1	Mise en place de l'approche ACV-PARETO . . . . .	104
5.1.2	Modèle basé sur la loi PARETO et validation du modèle . . . . .	105
5.1.3	Résultats de l'approche simplifiée de l'ACV . . . . .	105
5.1.4	Conclusion de l'approche simplifiée de l'ACV-PARETO . . . . .	113
<b>5.2</b>	<b>Indicateur Composite Environnemental</b> . . . . .	<b>114</b>
5.2.1	Mesure de la qualité environnementale des bâtiments . . . . .	115
5.2.2	Résultats de l'approche synthétique de l'ACV . . . . .	117
5.2.3	Conclusion de l'approche synthétique . . . . .	119
<b>5.3</b>	<b>Adaptation de la réglementation environnementale à la Réunion</b> <b>120</b>	
5.3.1	Les conséquences réglementaires . . . . .	120
5.3.2	Définition du seuil pour la Réunion . . . . .	120
5.3.3	Comparaison entre la France et la Réunion . . . . .	122
5.3.4	Définition des seuils par phase à la Réunion . . . . .	122
5.3.5	Conclusion . . . . .	127

---

**L**E chapitre présent s'attache à l'évaluation simplifiée la qualité environnementale des bâtis à travers deux approches : une première approche simplifiée à partir d'un couplage ACV/PARETO, qui permettra d'évaluer l'impact environnemental d'un bâtis à partir d'un certains nombre de matériaux, et une seconde approche synthétisée, à partir de la création d'un Indicateur Composite Environnemental (ICE). Cet indicateur environnemental permettra d'évaluer plus rapidement l'ensemble de cycle de vie des bâtis selon plusieurs indicateurs, et nous pourrons à partir de ces évaluations, définir des seuils pour les territoires insulaires, dans le secteur du bâtiment.

## 5.1 Modèles environnementaux réduits

### 5.1.1 Mise en place de l'approche ACV-PARETO

Le principe de Pareto (ou règle des 80/20), souligne la particularité de certains systèmes ou phénomènes étudiés dont 80% des effets observés résultent de 20% des causes [Hardy 2010]. Il nous est apparu intéressant de coupler l'ACV et ce principe afin de définir une nouvelle approche simplifiée de l'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments.

L'objectif de notre démarche est, par cette approche simplifiée, une démocratisation des outils d'analyse afin de les rendre accessibles au plus grand nombre d'acteurs concernés et une facilitation de l'usage de ces outils par un grand nombre d'acteurs. Ces derniers permettront l'amélioration de nos modèles par un feedback des usages.

#### 5.1.1.1 Principe de la loi PARETO

La loi Pareto est un principe où 20% des actions ou produits expliquent naturellement 80% des résultats ou effets. Dans notre étude, les matériaux sont retenus selon leur influence. Ainsi, nous avons mis en évidence qu'un faible pourcentage des matériaux de construction des bâtiments peuvent expliquer à eux seuls près de 80% de l'impact total.

#### 5.1.1.2 Définition du périmètre de l'étude simplifiée

Dans ce chapitre, l'évaluation de l'impact environnemental a été réalisée sur l'aspect structurel pour le modèle simplifié ACV/PARETO. Dans cette partie, notre échantillon d'étude est constitué de 15 maisons individuelles.

Les catégories d'impacts évalués dans ce chapitre sont les suivants :

Indicateurs	Abréviations	Unités
Global Warming Potential	GWP	kg CO <sup>2</sup> eq
Acidification Potential	AP	kg SO <sup>2</sup> eq
Eutrophication Potential	EP	kg PO <sup>3-</sup> <sub>4</sub> eq
Ozone Depletion Potential	ODP	kg CFC-11
Secondary Raw Materials	SRM	kg

FIGURE 5.1 – Catégories d'impacts utilisées dans le cadre de l'évaluation simplifiée de l'ACV.

### 5.1.2 Modèle basé sur la loi PARETO et validation du modèle

La proportion des 20/80 reflète le concept selon lequel pas plus d'un cinquième des matériaux ne peut représenter plus de quatre quarts de l'effet global. L'impact total  $i$  d'un matériau donné  $m_k$  est défini comme suit :

$$i_{m_k} = m_k * q_k * EF_k \quad (5.1)$$

Où  $q_k$  est la quantité du matériau  $m_k$  et  $EF_k$  le facteur d'émission correspondant. Ainsi, pour un indicateur d'impact  $I$  donné, ce dernier s'exprime comme suit :

$$I_{LCA} = \sum_{k=1}^n i_{m_k} \quad (5.2)$$

$$I_{simplified} = \sum_{p=1}^{q < n} i_{m_p} \quad (5.3)$$

Où  $I_{LCA}$  est la valeur de l'indicateur évalué par l'ACV et  $I_{simplified}$  est celle de l'approche simplifiée proposée dans cette thèse. Le nombre optimal  $q$  de matériaux à retenir pour un indicateur est défini par la recherche du point d'inflexion sur le tracé de la courbe d'erreur absolue entre la valeur d'ACV calculé et estimé.

Pour un indicateur donné, les matériaux sont classés par ordre décroissant d'impact. Puis nous ajoutons progressivement un matériau à la fois. Ainsi, l'effet total cumulé est alors estimé. La courbe d'erreur diminue d'autant plus que l'on ajoute les matériaux.

Après avoir tracé la courbe d'erreur des données discrètes, le point d'inflexion est calculé en utilisant la dérivée de second ordre.

Si nous notons  $f_{err}(m)$  la fonction d'erreur, nous allons déterminer le nombre de matériaux pour lesquels  $f_{err}(m) \rightarrow 0$ .

Enfin, le modèle de régression est construit à partir du nombre de matériaux retenus sur un premier ensemble de données. Puis, nous utilisons les 15 autres maisons pour généraliser la formulation des modèles indicateurs. Les intervalles de confiance à 95% sont déterminés à partir de l'écart-type des valeurs des modèles de régression.

### 5.1.3 Résultats de l'approche simplifiée de l'ACV

#### 5.1.3.1 Définition de l'impact environnemental des matériaux et produits

Pour le GWP, les premiers résultats obtenus concernent tout d'abord les quinze premières maisons individuelles évaluées par l'ACV. Ces résultats, présentés ci-dessous, permettent d'établir le ratio moyen de la phase structurelle de chacune d'entre elles et ce, pour chaque indicateur étudié.

Les résultats montrent clairement qu'à La Réunion, la phase structurelle d'une

maison individuelle varie entre  $5,08E+02$  et  $1,18E+03$  kg  $CO_2eq/m^2$  pour le GWP, voir Tableau 5.1. Cette variation peut être expliquée par les matériaux et les produits utilisés dans ces maisons, tels que le béton, l'acier, l'aluminium.

TABLE 5.1 – Statistiques descriptives des résultats de l'ACV sur les 15 premières maisons individuelles

	GWP	AP	EP	ODP	SRM
Moyenne	8,56E+02	2,18E+00	9,48E-04	5,20E-07	8,23E+00
Min	5,08E+02	1,50E+00	5,80E-04	4,67E-08	3,26E+00
Max	1,18E+03	2,96E+00	1,16E-03	1,01E-06	1,27E+01
Ecart type	1,92E+02	4,37E-01	1,76E-04	2,73E-07	2,94E+00

Les fondations, les planchers, les dalles et les poteaux, sont les principales raisons pour lesquelles le béton est utilisé dans le secteur du GO.

La structure des bâtis peut être réalisée à partir de béton armé, acier, bois, gré cérame, aluminium 5.2



FIGURE 5.2 – Principaux matériaux de construction et produits utilisés

D'autres indicateurs ont été évalués, le potentiel d'acidification (AP), qui sont des gaz acides généralement libérés dans l'atmosphère en raison de la combustion, a également été évalué dans ce document. Pour ces quinze premières maisons, l'AP varie entre  $1,50E+00$  et  $2,96E+00$  kg  $SO_2eq/m^2$ . Cette variation s'explique essentiellement par les différents matériaux et produits utilisés pour chaque maison (ciment,

liant, acier, métal, aluminium). Selon leur extraction, leur fabrication et parfois leur transformation, les matériaux et produits déposent une quantité de contaminants acidifiants sur le sol, les eaux (souterraines et de surface), les organismes biologiques et les écosystèmes pour construire les maisons individuelles.

Le potentiel d'eutrophisation (EP) est l'une des principales causes de la pollution atmosphérique et de la destruction des forêts. Suite à l'évaluation réalisée pour l'EP sur les MI, les résultats ont montré que l'impact environnemental varie entre  $5,80E-04$  et  $1,16E-03$  kg  $PO_4^{3-}$  eq/m<sup>2</sup>. Ces variations s'expliquent en partie par les matériaux et produits utilisés dans ces maisons, tels que l'acier, le béton et les plaques de plâtre.

Concernant l'ODP, dû au potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone, les résultats varient de  $4,67E-08$  et  $1,01E-06$  kg CFC – 11/m<sup>2</sup>. Enfin, pour le SRM, qui mesure l'impact des matières premières secondaires, les résultats indiquent un impact allant de  $3,26E+00$  à  $1,27E+01$  kg/m<sup>2</sup>. Ces résultats représentent le ratio moyen en fin de vie des bâtiments. Grâce à ces ressources et produits récupérés, l'île bénéficierait d'une plus grande sécurité d'approvisionnement, d'une réduction de la consommation de matériaux et d'énergie, d'une diminution des conséquences climatiques et environnementales et d'une baisse des coûts de fabrication.

Cependant, il existe plusieurs obstacles à l'utilisation des matières premières secondaires, notamment l'absence de normes de qualité européennes et françaises pour ces matières. Les difficultés liées au commerce des matières premières secondaires, le manque de transparence dans l'utilisation de ces matières et la présence potentielle de substances dangereuses dans les matériaux recyclés, sont des éléments qui doivent impérativement être pris en compte. De plus, la perception de la population à l'idée d'utiliser une ressource recyclée est encore négative. Construire un bâti est pour l'heure associé à la notion de neuf et par conséquent de matériaux "neufs". Enfin, l'usage de ce type de matériau pose également des questions de responsabilité et de garantie de la performance du produit.

### 5.1.3.2 Résultats de la méthode d'inflexion

Cette approche par détermination du point d'inflexion d'une courbe a été utilisée pour établir selon les indicateurs, expliquant la plus grande part d'information de ces derniers. Comme le montre la figure 5.3, le nombre de matériaux, et les matériaux eux-mêmes expliquant la part de l'impact total varient selon les indicateurs observés. Le point d'inflexion est représenté par un point rouge que nous voyons sur la figure 5.3. La courbe verte représente quant à elle l'erreur absolue entre la valeur de l'indicateur ACV et l'approche simplifiée.

Lorsque nous analysons tous les indicateurs confondus ensemble, il est à noter que l'erreur diminue plus ou moins rapidement selon les indicateurs. Ainsi, on peut noter que 5 à 6 matériaux sont suffisants pour expliquer 80% de la valeur d'un indicateur dans la plupart des cas. Cela nous permet de construire les fonctions régressives

en ajustant les coefficients associés à chacun des matériaux. Nous verrons les équations détaillées dans la section suivante. Une nomenclature est mise en évidence ci-dessous pour une meilleure lecture des abréviations utilisées dans les figures cf. 5.2

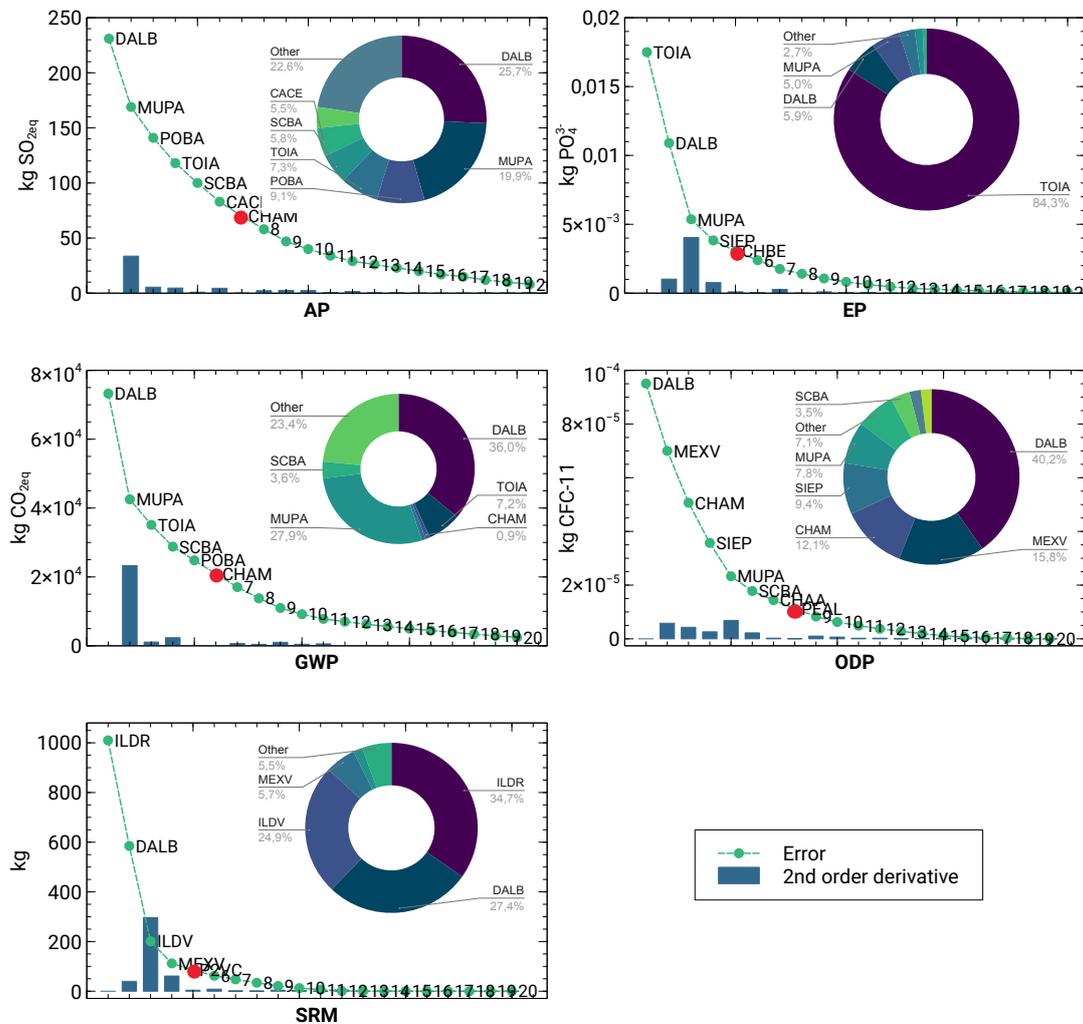


FIGURE 5.3 – Nombre optimal de matériaux indiqué par l'approche d'inflexion pour évaluation environnementale

TABLE 5.2 – Nomenclature

DALB	Dallage en béton
CHAA	Charpente en acier
CHAM	Charpente métallique

---

PANC	Pannes C
CHLI	Chainage linteaux
POBA	Poutres, poteaux en béton armé
MUPA	Mur en bloc/ parpaing
TOIA	Toiture en acier
ENN	Enduit intérieur
ENEX	Enduit extérieur
CHBE	Chape mortier/ chape en béton
CACE	Carrelage en céramique
ILDV	Isolation Laine de Verre
ILDR	Isolation Laine de Roche
FPPL	Faux plafonds en placo
SIEP	Séparation/Cloison intérieur enduit plâtre et faux plafond
SCBA	Séparation/ Cloison en bloc américain
M2VAC	Menuiseries intérieures en aluminium -type fenêtre 2 VTX coulissant
M2VAB	Menuiseries intérieures en aluminium -type fenêtre 2 VTX battant
MEXA	Menuiseries extérieures en aluminium
REFI	Revêtements façades intérieures -type peinture
REFE	Revêtements extérieurs - type peinture
PEAL	Porte d'entrée en aluminium pleine masse
MEXV	Menuiseries extérieures -type volet roulant motorisé
JALA	Jalousie en aluminium
P2VC	Porte coulissante baie vitrée 2 VTX
CASS	Chassis à soufflet en aluminium
CFIX	Chassis fixe en aluminium

---

Si l'on considère le GWP, l'AP et l'ODP, le béton est le produit qui a le plus d'impact avec respectivement 36%, 25,7% et 40,2%. Le béton présente la double caractéristique d'être à la fois le produit le plus consommé et le plus impactant dans le secteur de la construction. Il présente ainsi un FE très élevée de 2,88 E+02 kg CO<sub>2</sub> eq, et un ratio moyen global *pour les quinze maisons étudiées* de 342 kg CO<sub>2</sub> eq. Il est le deuxième produit le plus consommé sur Terre après l'eau [ISO 2005, Weil 2006]. La fabrication du ciment consomme de grandes quantités de ressources naturelles et entraîne un épuisement des ressources naturelles et contribue au réchauffement climatique. Il y a la volonté de repenser à la formulation du béton en y associant de nouveaux liants dans le domaine de la R&D. Les travaux actuels portent à la fois de nouveaux liants mais également sur la substitution du ciment sans perte des propriétés mécaniques du béton.

Concernant l'EP, le produit le plus impactant est l'acier avec 80,4% suivi du béton avec 5,9%. L'impact élevé de l'acier s'explique par ses phases de production (extrac-

tion, traitement, transformation) et de construction (fabrication, fret maritime), qui à elles seules émettent un grand nombre d'émissions de GES et d'autres émissions atmosphériques et ont un impact sur l'environnement. Ces impacts sont fortement préjudiciables et sont à l'origine d'apports excessifs de phosphore (y compris dans le secteur de l'énergie), et aussi sous forme de phosphate  $\text{PO}_4^{3-}$  et d'azote (nitrate  $\text{NO}_3$  pour le protoxyde d'azote).

Pour le SRM, c'est principalement l'isolation (laine de roche), qui a le plus d'impact, avec 34,7% suivie par le béton avec 27,4% et un autre type d'isolation (laine de verre) ainsi que la menuiserie extérieure en aluminium à 24,9 et 5,7% respectivement.

La production du liant et des roches telles que le basalte et la scorie est également prise en compte. En plus de ces matières premières, des matériaux recyclés (briquettes) sont utilisés comme intrants. Le transport est également inclus dans cette évaluation ultérieure de l'impact environnemental de la laine de roche (transport vers la fabrication). Enfin, le processus de production est pris en compte dans l'évaluation environnementale de l'isolant.

### 5.1.3.3 Validation du modèle simplifié

### 5.1.3.4 Résultats simplifiés de l'ACV

Les résultats présentés ici font suite à des évaluations environnementales distinctes :

- l'ACV des maisons (ensemble des matériaux et produits utilisés pour la construction des MI) ;
- l'ACV des matériaux simplifiés (uniquement les matériaux et produits déterminés par la méthode ci-dessus

Les résultats de la méthode simplifiée à partir de l'approche par inflexion nous ont permis de construire plusieurs fonctions régressives, pour estimer la valeur des indicateurs environnementaux. Les équations ci dessous résument la formulation des fonctions linéaires permettant de les estimer selon la série d'équations :

$$GWP = \sum_i FE_i \times Mat_i + \varepsilon_{GWP} \quad (5.4)$$

$$EP = \sum_j FE_j \times Mat_j + \varepsilon_{EP} \quad (5.5)$$

$$ODP = \sum_k FE_k \times Mat_k + \varepsilon_{ADP} \quad (5.6)$$

$$SRM = \sum_l FE_l \times Mat_l + \varepsilon_{SRM} \quad (5.7)$$

Avec,

$i = \{\text{DALB, MUPA, POBA, TOIA, SCBA, CACE, CHAM}\}$

$j = \{\text{TOIA, DALB, MUPA, SIEP, CHBE}\}$

$k = \{\text{DALB, MEXV, SIEP, FPPL, PEAL}\}$

$l = \{\text{ILDR, DALB, ILDV, MEXV, P2VC}\}$

Ces séries de matériaux ont été obtenus lors de l'étape de définition optimale du nombre de matériaux selon la méthode d'inflexion. Les résultats obtenus mettent en évidence qu'un petit nombre de matériaux et produits provenant des maisons représentent à eux seuls environ 70 à 90% de l'impact total des maisons individuelles. Cela remet en question la suggestion initiale selon laquelle le principe de Pareto peut être utilisé pour simplifier l'ACV des MI. La comparaison des résultats sur les quinze premières maisons nous a permis de faire ces premières observations cf. Figure 5.4 .

Selon la méthode d'inflexion, pour des indicateurs tels que le GWP, l'AP, l'EP et le SRM, les différences entre l'évaluation mesurée et la méthode simplifiée restent minimales, à 4,09%, 8,23%, 0,48% et 3,44% respectivement. Cependant pour l'ODP, la différence est légèrement plus élevée, à 11,50%.

### 5.1.3.5 Validation et incertitudes

Dans cette partie, une première étape a été la vérification des résultats par le modèle de régression simplifié e.g modèle utilisé pour évaluer les maisons. Puis, une autre étape a été effectuée pour une validation de la pertinence de nos résultats lors de cette seconde étape.

Nous avons mesuré l'incertitude associée au modèle simulé. Nous observons dans la figure 5.5, que la méthode de simulation Pareto prédit avec précision, plus de 80% des effets de l'ACV détaillée. L'erreur relative moyenne est de 5,86% pour tous les indicateurs. Les indicateurs ODP et AP ont la plus faible précision avec respectivement 6,76% et 8,79% en utilisant notre méthode, tandis que tous les autres indicateurs ont une erreur à 5%.

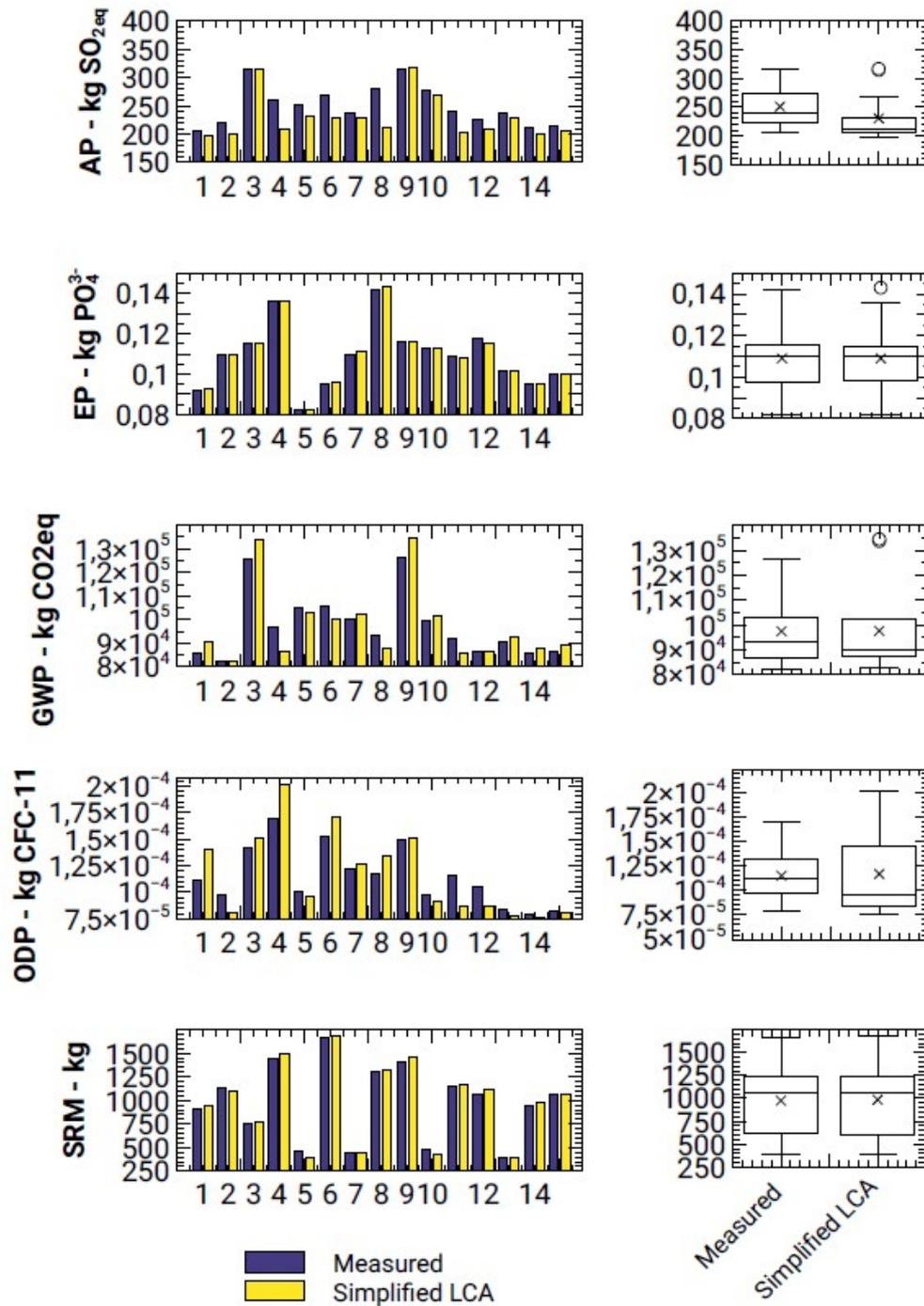


FIGURE 5.4 – Comparaison des résultats de l'approche simplifiée et de l'ACV détaillée

Les résultats de Pareto et de l'ACV détaillée nous ont apportés des connaissances précieuses sur la manière de réaliser une évaluation environnementale. L'ACV produit des résultats quantitatifs pour certains matériaux, mais tous les matériaux n'ont

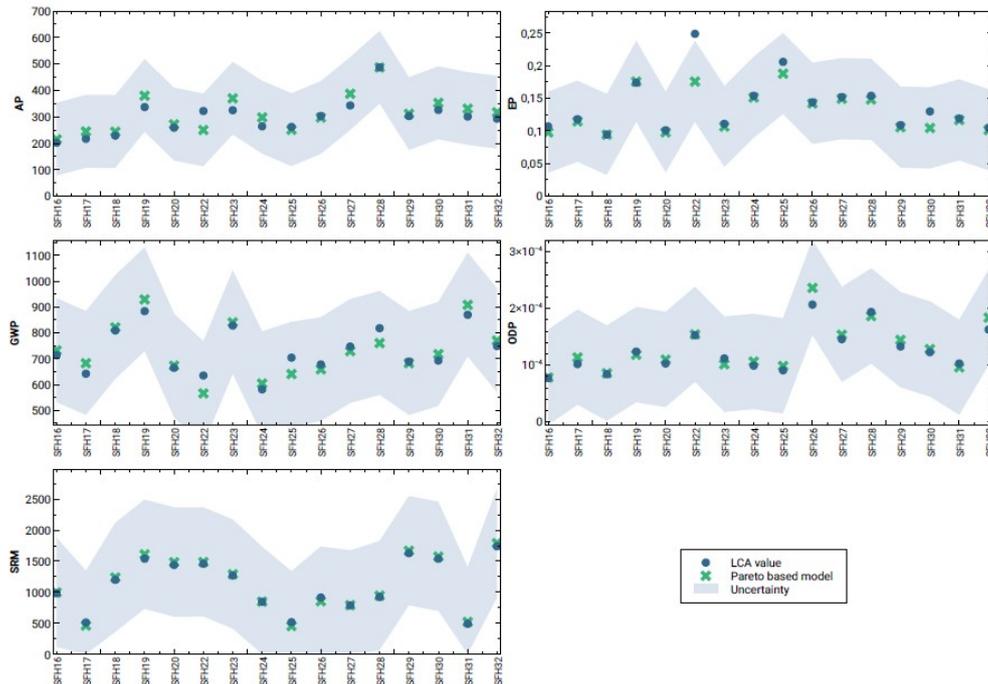


FIGURE 5.5 – Validation du modèle de Pareto sur un nouveau jeu de données avec une intervalle d'incertitude

pas un potentiel d'impact. Certains impacts négatifs et des effets secondaires associés à la transformation des matériaux et des biens peuvent être négligés. L'approche simplifiée permet de cibler précisément les éléments à évaluer, ce qui permet une évaluation rapide de la qualité environnementale des maisons.

L'incertitude associée aux résultats des modèles simplifiés reste cohérente avec l'intervalle à 95% qui englobe toutes les approches méthodologiques. Ceci démontre l'importance d'établir avec précision des FE régionalisés pour un nombre limité de matériaux indicatifs des méthodes de construction de la Réunion. L'évaluation peut alors être simplifiée pour l'analyse initiale sans recourir à une analyse rigoureuse de l'ACV.

#### 5.1.4 Conclusion de l'approche simplifiée de l'ACV-PARETO

Cette première partie a mise en évidence la possibilité d'évaluer l'impact environnemental des bâtis classiques, à partir d'une méthode simplifiée, mise en place à partir du couplage de la méthodologie de l'ACV et la Loi Pareto. L'objectif de ces travaux a été de rendre l'approche ACV accessible aux acteurs locaux, aux équipes de projet de construction, de développement et aux parties prenantes. La question environnementale s'invitant de plus en plus dans le cadre réglementaire du bâtiment,

il est dès lors primordial de disposer d'outils et approche simplifiée de l'ACV. Notre but dans cette section était de proposer une première démarche qui est un compromis entre modèle simplifié et incertitude faible. Les modèles régressifs peuvent ainsi être accessibles à n'importe quel acteur du secteur de la construction.

En termes de résultats, les modèles donnent des résultats comparables aux implémentations complètes de l'ACV. Nous avons observé pour tous les indicateurs que l'erreur est de 5%. Comme dans nos précédents travaux, nous avons échantillonné une trentaine de maisons et effectué une analyse approfondie du cycle de vie.

Pour cela, nous avons adopté l'affirmation d'Arzoumanidis et al., & Soust-Verdaguer et al., selon laquelle l'ACV simplifiée « se situe quelque part entre l'ACV de sélection et l'ACV complète » et qu'en ce sens, elle simplifie l'application de la technique de l'ACV [Arzoumanidis 2017, Soust-Verdaguer 2016b]. Par conséquent, notre approche accélère le processus de recherche. Nous pouvons diviser par quatre le temps nécessaire à l'analyse, qui passe de deux heures pour une ACV dite « complète » à un peu moins de trente minutes pour la méthode simplifiée. Au-delà des modèles développés, notre démarche est avant tout itérative. En démocratisant cette approche simplifiée, l'objectif est d'éprouver notre méthode afin d'ajuster les modèles mais d'étoffer notre base de connaissances de matériaux.

## 5.2 Indicateur Composite Environnemental

Les indicateurs composites (IC) sont aujourd'hui des outils d'aide à la décision dans de nombreux secteurs [Singh 2009, Mainali 2014, Praene 2018]. Ces derniers sont souvent utilisés comme support d'aide aux décisions politiques, comme éléments stratégiques de la planification [Commission 2008]. L'intérêt principal des IC est qu'ils permettent de rendre accessible l'illustration de phénomènes ou questions complexes dans des champs très variés. Il est dès lors plus aisé pour des acteurs d'un secteur, les décideurs politiques de s'approprier les enjeux. Enfin comme souligné par [Saltelli 2007] ces approches synthétiques permettent en particulier des analyses comparatives de performances des systèmes d'étude.

Toutefois, la crédibilité des IC est souvent discutée. En effet les variables retenues, ainsi que la méthode de construction d'un indicateur peuvent faire changer de façon radicale les résultats [Vollmer 2016]. Il est donc primordial de définir avec une rigueur scientifique "l'objectif de la mesure" puis de définir clairement "les périmètres et les variables associées" pour le modèle.

L'objectif de cette section est de proposer à travers la définition d'un indicateur une autre approche synthétique de l'ACV. Notre démarche n'est pas ici de se substituer à l'ACV mais de s'appuyer sur ses résultats afin de construire un indicateur synthétique qui facilitera notre analyse. Nous proposons dans ces travaux un cadre incluant des seuils qui pose les bases de la définition d'une étiquette environnemen-

tale des bâtiments.

### 5.2.1 Mesure de la qualité environnementale des bâtiments

La construction d'un IC doit suivre plusieurs étapes spécifiques qui garantissent la pertinence et la qualité du modèle finalement défini, comme proposé par [Commission 2008] :

- définir clairement les limites du système à mesurer ;
- sélectionner l'ensemble des variables et des sous-groupes définissant le phénomène ;
- choisir la méthode de normalisation et pondération des données ;
- définir la technique de construction du modèle.

Nous constatons que l'une des grandes difficultés de la construction des IC est l'effet des variables, i.e. ces dernières n'ont pas forcément un effet positif sur l'indicateur. Dans le cas de l'ACV, la question ne se pose pas car plus l'indicateur (GWP, AP, TOPP...) est grand, et plus son effet est négatif.

Pour construire notre indicateur nous avons opté pour deux approches classiques l'une à poids égal, l'autre en extrayant le poids des variables à partir d'une analyse en composante principale. En préambule de chacune des constructions d'indicateurs, l'ensemble des variables sont standardisées selon la méthode min-max classique comme indiqué à l'équation 5.8,

$$x = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (5.8)$$

#### 5.2.1.1 La méthode d'agrégation

Cette première approche est basée sur une agrégation à poids égal telle qu'utilisée, par exemple, dans la définition de l'IDH<sup>1</sup>, [McGillivray 1993]. Nous choisissons dans un premier temps de considérer que toutes les variables sont équipondérées. Cela permet d'attribuer la même importance à chacune des variables. Ainsi dans cette approche nous avons utilisé les 7 variables sur les trois phases du cycle de vie soit un total de 21 paramètres.

Nous avons donc appliqué une moyenne géométrique et arithmétique cf. équation 5.9 aux trois phases de l'analyse de cycle de vie pour le bâtiment :

$$ICE = \left( \sum_{i=1}^7 x_i \right)_{struct}^{\frac{1}{3}} \times \left( \sum_{i=1}^7 x_i \right)_{fonct}^{\frac{1}{3}} \times \left( \sum_{i=1}^7 x_i \right)_{finvie}^{\frac{1}{3}} \quad (5.9)$$

---

1. Indice de Développement Humain

Où  $x_i$  désigne les indicateurs environnementaux retenus dans le cadre de ce chapitre. Cette première formulation équi pondérée permet de donner une première évaluation de l'impact en ayant pour objectif d'être performant sur l'ensemble des indicateurs environnementaux.

### 5.2.1.2 L'approche par ACP

L'analyse en composante principale est un outil d'analyse largement utilisé pour l'analyse de données. L'ACP est une technique utile pour transformer un grand nombre de variables dans un ensemble de données plus petit et plus cohérent de facteurs non corrélés (orthogonaux), *les composantes principales*. Ces composantes principales sont elles mêmes des combinaisons linéaires pondérées des variables initiales. L'ACP est une méthode fréquemment utilisée pour construire des fonctions régressives [Romano 2016].

De fait, les composantes sont ordonnées de manière à ce que la première composante représente la plus grande part de la variance totale contenu dans les données initiales. La deuxième composante n'est absolument pas corrélée avec la première composante, et représente la variation maximale qui n'est pas prise en compte par la première. Ainsi, l'ACP apparaît comme un outil de sensibilité qui sélectionnerait les variables les plus pertinentes à retenir. Une composante principale  $PC_i$  est défini par équation 5.10 :

$$PC_i = \alpha_{ij} \cdot X_j \quad (5.10)$$

$\alpha_{ij}$  représente la contribution en pourcentage de la variable  $X_j$  à la construction de la composante principale  $PC_i$ . Plusieurs auteurs ont déjà eu recours à l'ACP pour définir des indices composites, [Gupta 2008, Gnansounou 2008, Praene 2019]. Une fois les composantes principales définies, l'indicateur composite s'écrit alors sous la forme suivante :

$$ICE = \sum_{i=1}^{n < 21} \frac{\lambda_i \cdot PC_i}{\sum_{i=1}^{n < 21} \lambda_i} \quad (5.11)$$

$\lambda$  représente les valeurs propres de la matrice des corrélations des variables de la base de données. Pour rappel ce dernier est obtenu en calculant le déterminant de l'équation  $(R - \lambda I) = 0$ . D'une manière générale et suivant les cas, le nombre de composantes principales que nous avons retenu varie de deux à quatre.

La formulation générique proposée à l'équation 5.11 est retenue en fixant un nombre fini de composante principale à retenir. Comme évoqué par [Kassambara 2017], il n'existe pas à l'heure actuelle un véritable consensus sur la manière de retenir les composantes principales les plus pertinentes.

De facto, nous avons adopté le critère de [Kaiser 1961] i.e.  $\lambda > 1$ . Au final, par le biais de l'ACP, nous avons pu sélectionner les variables les plus significatives.

Deux approches ont été envisagées : une première prenant en compte les 21 variables lors d'une ACP globale, et une seconde technique a été d'effectuer l'ACP sur chacune des trois phases.

## 5.2.2 Résultats de l'approche synthétique de l'ACV

### 5.2.2.1 Résultats des différentes formulations de l'indicateur environnemental

Les résultats d'agrégation à poids égal ont été calculés pour chacune des phases du cycle de vie. Comme le montre la Figure 5.6, nous constatons que les phases structurelles et de fin de vie représentent une part importante de cet indicateur. La partie fonctionnelle a globalement la même intensité quelque soit les maisons considérées. On peut ainsi noter que le fait de considérer toutes les variables à égale influence semble faire ressortir une certaine uniformité dans le profil des maisons individuelles.

Ainsi, bien que cette méthode soit facile d'accès, elle apporte un biais en sures-

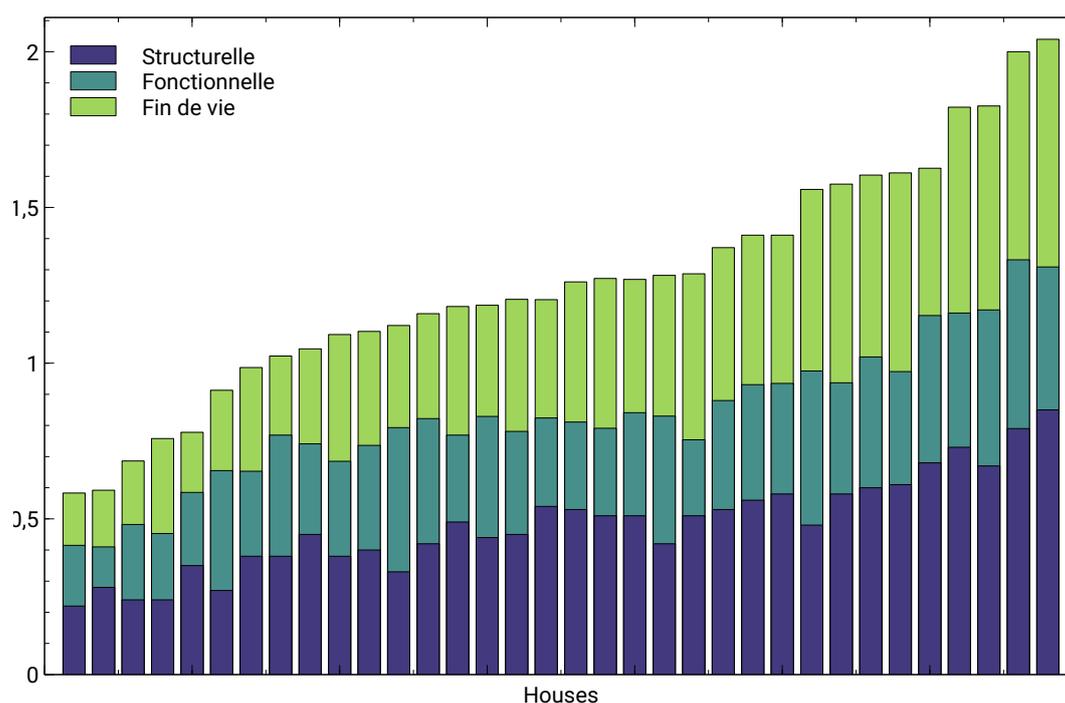


FIGURE 5.6 – Résultats de l'indicateur environnemental par agrégation équipondérée.

timant la part notamment de la fin de vie sur les émissions totales. La Figure 5.6 montre que cinq maisons présentent un bon score environnemental avec une valeur inférieure à un. L'essentiel de l'échantillon correspondant aux 19 maisons suivantes se situe dans un score intermédiaire [1 - 1,49]. Enfin les maisons présentant les plus mauvaises performances environnementales ont un score supérieur à 1,5.

L'étape suivante a été donc été de recourir à l'ACP afin de déterminer les variables les plus pertinentes. Notre première hypothèse a été de faire une ACP sur chacune des phases du cycle de vie. Ainsi, nous avons fait le choix de considérer que chacune des phases a la même importance. L'ACP ne sert qu'à sélectionner quels indicateurs environnementaux retenir pour le calcul final.

Les résultats de l'ACP sur chacune des phases a mis en évidence que seul les trois premières composantes principales étaient porteuses d'une information pertinente. Cette deuxième représentation de l'ICE (voir Figure 5.7) montre une dynamique plus

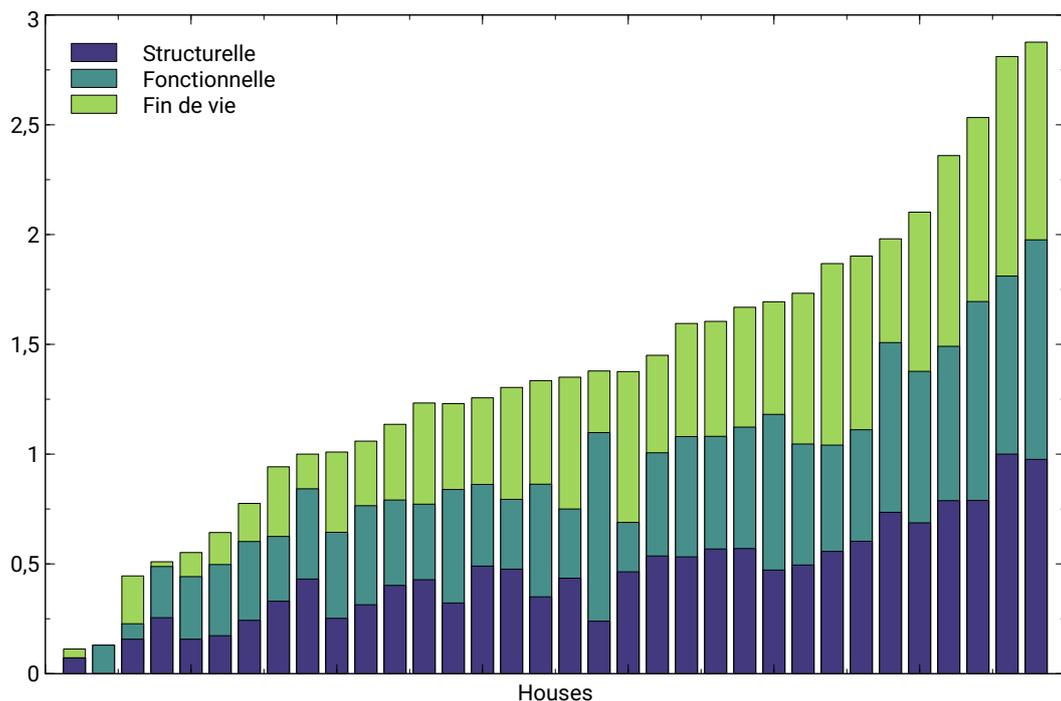


FIGURE 5.7 – Résultats ICE par la méthode ACP appliquée à chaque phase.

grande contrairement à la méthode d'agrégation classique. Ainsi le score environnemental total est d'autant plus grand que l'impact est d'autant plus important. Les phases fonctionnelles ont des impacts relativement proches, les plus grandes variations interviennent au niveau des phases structurelles.

L'ACP a mis en évidence sur la première composante principale qui résume la plus grande part d'informations, cinq variables principales que sont le GWP, l'AP, l'EP, l'ADP-E et l'ADP-F. Le fait de standardiser les résultats et de mettre le poids de chaque phase égal, permet de rendre lisible l'impact des phases entre elles. Nous soulignons que l'analyse de la phase fonctionnelle a souvent tendance à écraser les résultats des deux autres phases.

Toutefois une précision doit être apportée : la standardisation se faisant par phase, la lecture d'une intensité d'impact ne doit se faire qu'au sein même de la phase. C'est

donc pour cette raison que l'une des remarques sur ces résultats est qu'un impact total fort se traduit la plupart du temps par de fortes intensités dans chacune des phases.

Ainsi, cette approche de la construction de l'ICE par phase est intéressante dans l'optique de définir les modalités pour améliorer un projet. On peut ainsi, attribuer une étiquette environnementale à chacune des phases et de se fixer par exemple qu'une maison ayant une note de **AAA** sur l'ensemble du cycle aura la meilleure qualité environnementale. On pourra de fait, identifier sur quelle phase agir pour améliorer les performances.

Dans une dernière étape nous avons construit notre indicateur en considérant les 21 variables dans une matrice de données unique. Nous y avons appliqué l'ACP pour identifier quelles composantes et quelles variables retenir pour la construction de notre indicateur composite. L'ACP a montré que seules les trois premières composantes contiennent une information pertinente. Nous avons ainsi identifié 10 variables comme pertinentes à la construction des composantes :

- Phase structurelle :  $GWP_{struct}$ ,  $ACO_{struct}$ ,  $AP_{struct}$ ,  $SRM_{struct}$  ;
- Phase fonctionnelle :  $ACO_{fonct}$ ,  $AP_{fonct}$ ,  $ADP-F_{fonct}$  ;
- Phase fin de vie :  $ACO_{fdvie}$ ,  $AP_{fdvie}$ ,  $SRM_{fdvie}$  ;

Ce sont donc à partir de ces variables que nous avons reconstruit les formules des composantes principales et par conséquent notre ICE. La Figure 5.8 montre les résultats de l'indicateur créé pour les 34 maisons individuelles avec l'incertitude associée aux calculs. Cette approche nous semble la plus intéressante car elle ne retient que les variables les plus pertinentes.

De plus, on constate clairement des paliers sur les valeurs obtenues : on note que les maisons présentant les meilleurs scores environnementaux ont des valeurs inférieures à 0,25. Les plus mauvais scores environnementaux ont des valeurs supérieures à 0,5. On retiendra comme caractéristique principale pour notre indicateur que ce dernier est représenté essentiellement par deux indicateurs : le GWP en phase structurelle et l'AP dans les trois phases.

### 5.2.3 Conclusion de l'approche synthétique

Au final, grâce aux différentes approches que nous avons exploré, il est dès lors possible, d'attribuer simplement un score environnemental. Cela permet de façon rapide de comparer des choix de mise en oeuvre sur un projet ou encore d'identifier sur un bâti existant où se situent les points noirs qu'il faut résoudre afin d'améliorer la qualité environnementale globale. Cependant cette approche possède une limite dans laquelle les variables retenues pour l'IC dans notre étude n'est pas valable pour toutes les typologies.

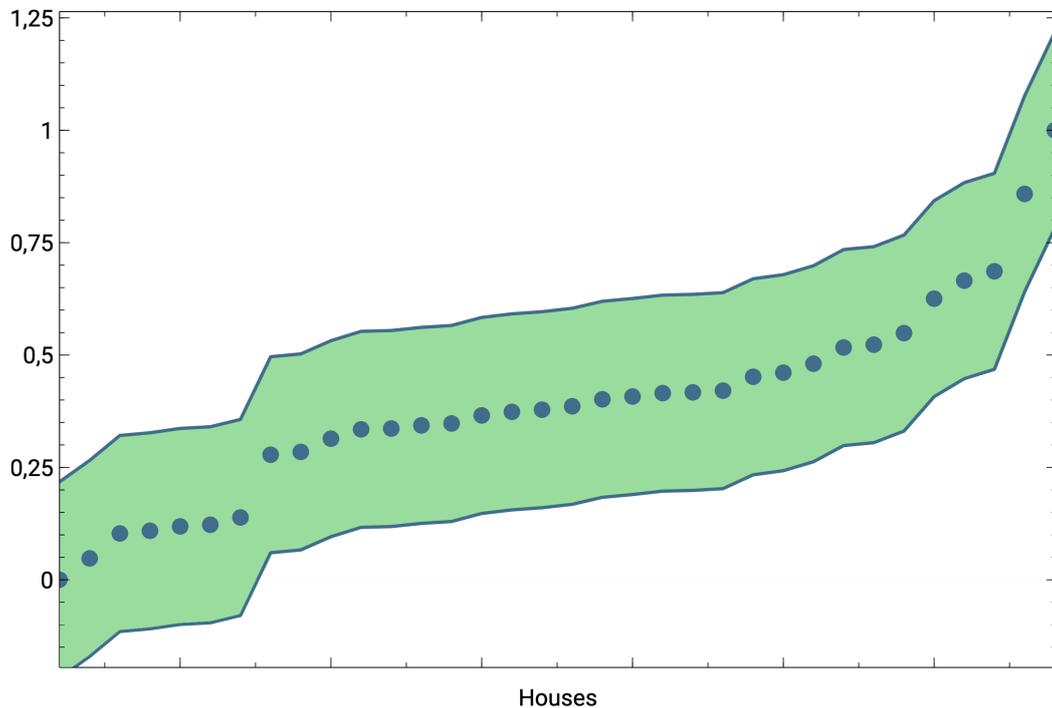


FIGURE 5.8 – Résultats de l'ICE par ACP globale

## 5.3 Adaptation de la réglementation environnementale à la Réunion

### 5.3.1 Les conséquences réglementaires

Concernant les réglementations à la Réunion, nous notons qu'aujourd'hui il n'existe véritablement pas de seuil inscrit pour définir les performances environnementales d'un bâti dans l'ensemble de son cycle de vie. L'évaluation que nous avons effectué depuis le début de nos travaux nous a permis de déterminer différentes typologies de MI qui laissent apparaître trois typologies, par palier d'impacts. A travers l'identification de ces paliers, nous proposons des seuils de performances environnementales adaptées.

### 5.3.2 Définition du seuil pour la Réunion

Actuellement à la Réunion, lorsque nous regardons l'impact environnemental des bâtis, nous constatons que l'impact de la construction d'une maison individuelle est en moyenne de 808 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> avec des valeurs minimales et maximales de

517 et 1237 respectivement, et celui d'un immeuble résidentiel à 1888 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, avec cette fois-ci des valeurs minimales et maximales de 654 et 3717 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> respectivement cf. figure 5.9.

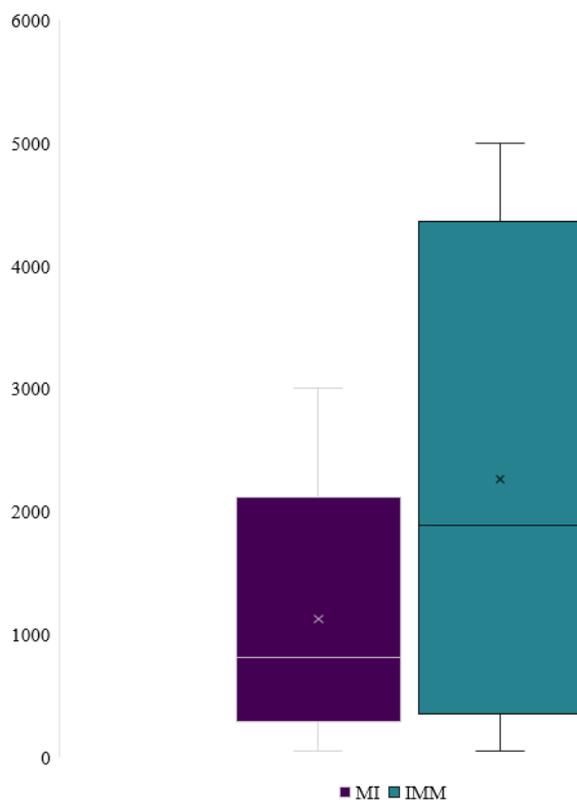


FIGURE 5.9 – Comparaison de la distribution de l'impact environnemental des maisons individuelles et des immeubles pour le GWP - kg CO<sub>2</sub> eq /m<sup>2</sup>

Selon les seuils prévus dans la RE 2020 à échelle nationale, il est indiqué qu'une diminution de 30% des impacts carbone dans la construction des bâtiments est prévu d'ici 2031.

Si nous tenons compte des seuils pour la Réunion, nous sommes amenés d'ici les dix prochaines années à diminuer notre impact pour la construction des maisons individuelles, en ramenant une moyenne de construction allant actuellement de 808 à 566 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> avec des valeurs minimales qui passeront de 517 à 316 et des valeurs maximales qui passeront de 1237 à 865 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> respectivement. Pour le cas des immeubles, nous sommes amenés d'ici 2031 à diminuer notre impact pour la construction en ramenant une moyenne allant actuellement de 1888 à 1321 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, avec des valeurs minimales qui passeront de 654 à 457 et des valeurs maximales de 3717 à 2601 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> respectivement, cf. figure 5.10.

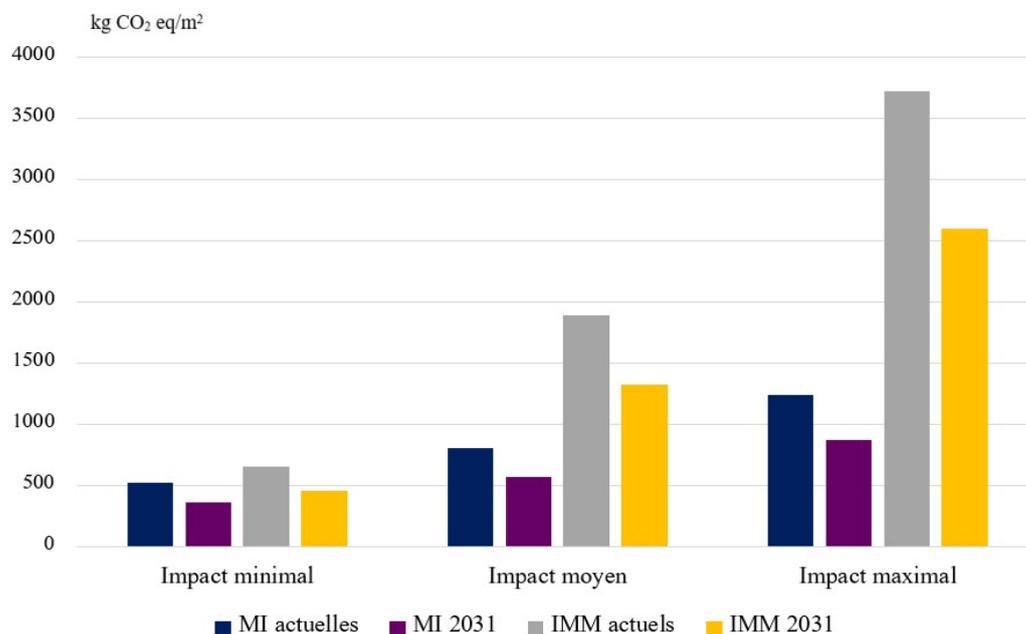


FIGURE 5.10 – Comparaison des impacts carbonés des maisons individuelles et des immeubles pour le GWP en 2031 - kg CO<sub>2</sub> eq /m<sup>2</sup>

### 5.3.3 Comparaison entre la France et la Réunion

Lorsque nous comparons les seuils entre la France et la Réunion, nous constatons que les seuils doivent être adaptés en fonction de la situation de chacun de ces territoires français. En effet, n'ayant pas les mêmes points d'approvisionnement ni les mêmes modes de transport, ni la même localisation géographique, plusieurs critères expliquent la différence entre ces deux territoires, et surtout le surcoût environnemental qu'il existe pour le cas de la Réunion dans le cadre de la construction. Concernant la construction des immeubles de logements résidentiels, le ratio moyen pour la France s'élève actuellement de 740 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> comparé à 1888 pour le cas de la Réunion, cf. figure 5.11.

L'objectif ici n'est pas de tenter d'atteindre les mêmes seuils affichés pour la France, mais de tenter de réduire les impacts carbonés en effet de 30% également pour la Réunion, ce qui nous mènerait à diminuer nos impacts aussi de 30%, à partir de notre impact actuel qui est largement plus conséquent.

### 5.3.4 Définition des seuils par phase à la Réunion

Concernant le cas des maisons individuelles, nous partons sur une première hypothèse d'une diminution de 30% sur l'aspect structurel en 2031, nous passons de

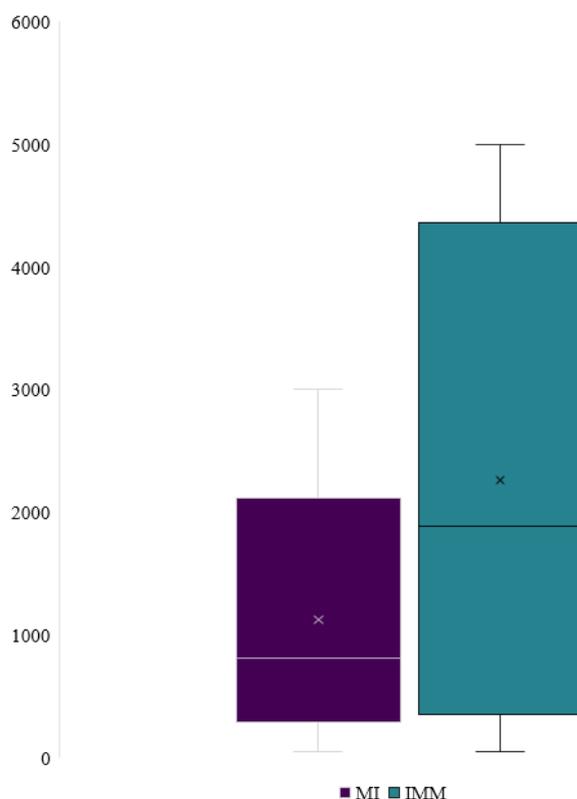


FIGURE 5.11 – Comparaison des boxplot des maisons individuelles et des immeubles entre la France et la Réunion pour le GWP - kg CO<sub>2</sub> eq /m<sup>2</sup>

808 à 566 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. Nous atteignons donc un impact total du cycle de vie des MI passant de 2404 à 2161 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, comme nous le montre la figure 5.12.

Si nous partons sur une seconde hypothèse, ou cette fois-ci nous considérons une diminution de 30% sur l'aspect structurel et de 50% sur l'aspect fonctionnel des maisons individuelles d'ici 2050, les impacts environnementaux sur l'ensemble de leur cycle de vie, passeraient de 2404 à 1564 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.

Concernant le cas des immeubles résidentiels, nous partons également sur une première hypothèse, qui est celle d'une diminution de 30% sur l'aspect structurel en 2031. Nous passons alors de 1888 à 1321 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.

Si nous partons ensuite sur une seconde hypothèse, où nous considérons une diminution de 30% sur l'aspect structurel et de 50% sur l'aspect fonctionnel des immeubles résidentiels d'ici 2050, les impacts environnementaux sur l'ensemble de leur cycle de vie, passeraient de 3650 à 2770 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.

Ainsi, nous clôturons ce chapitre en tenant compte des étiquettes qui ont été créées et mises en place pour servir de base aux acteurs locaux concernant l'impact total des bâtis à la Réunion. Nous présentons ci-dessous les seuils qui sont à considé-

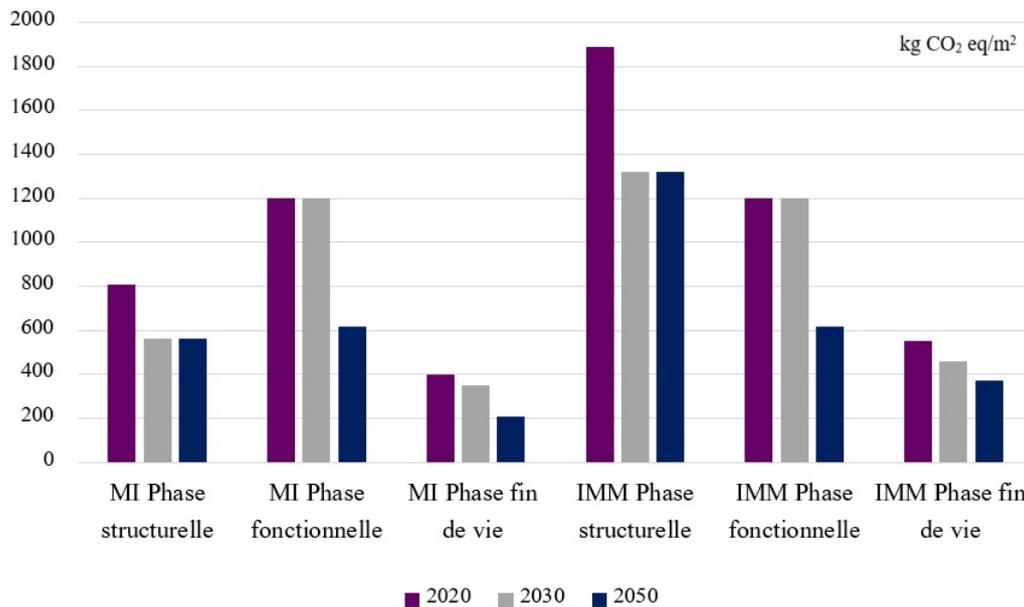


FIGURE 5.12 – Évaluation environnementale des bâtis de type maison individuelle et immeubles résidentiels en tenant compte des seuils prévus pour les 30 prochaines années - kg CO<sub>2</sub> eq /m<sup>2</sup>

rer pour les 30 prochaines années, en route pour une diminution des impacts environnementaux globaux, de 30% pour l'aspect structurel en 2031, et 50% pour l'aspect fonctionnel des bâtis d'ici à 2050, cf. figures 5.13, 5.14, 5.15 pour les maison individuelles et figures 5.16,5.17, 5.18 pour les immeubles résidentiels.

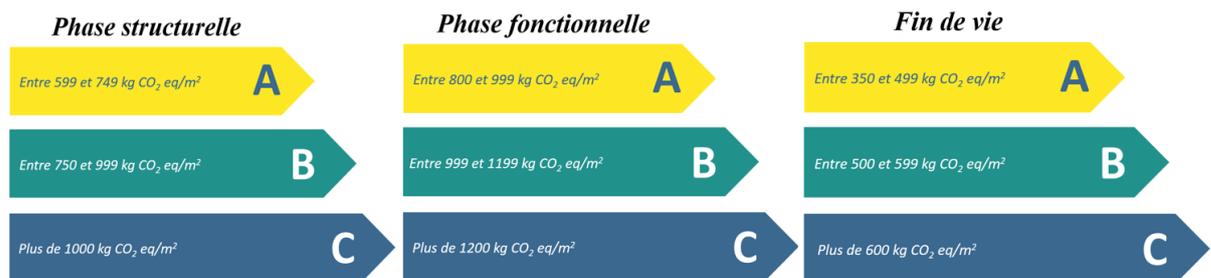


FIGURE 5.13 – Étiquettes pour l'évaluation environnementale des espaces bâtis (MI) en 2020 en milieu insulaire - Cas de la Réunion

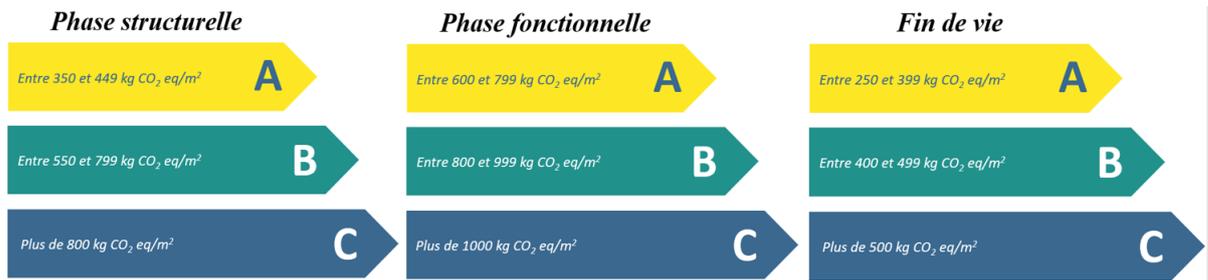


FIGURE 5.14 – Étiquettes pour l'évaluation environnementale des espaces bâtis (MI) en 2030 en milieu insulaire - Cas de la Réunion

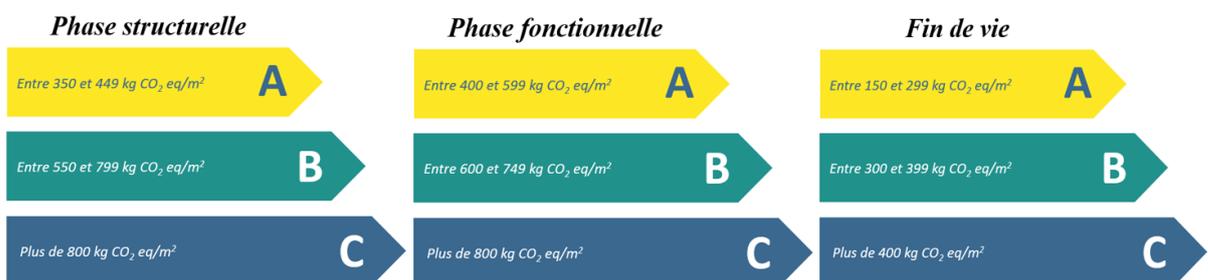


FIGURE 5.15 – Étiquettes pour l'évaluation environnementale des espaces bâtis (MI) en 2050 en milieu insulaire - Cas de la Réunion

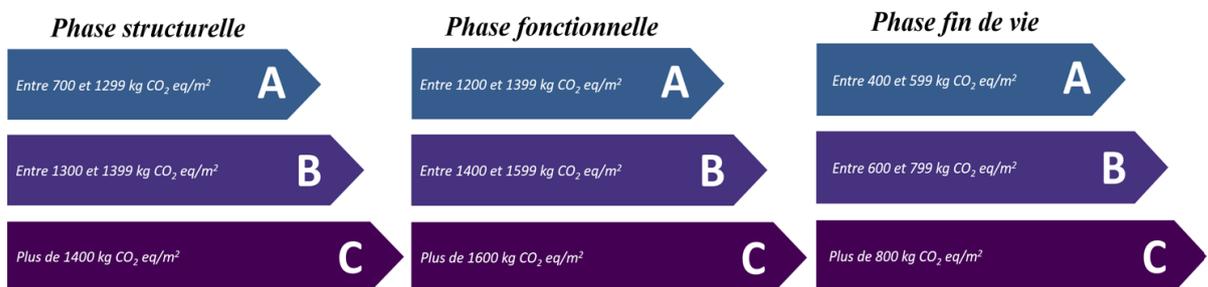


FIGURE 5.16 – Étiquettes pour l'évaluation environnementale des espaces bâtis (IMM) en 2020 en milieu insulaire - Cas de la Réunion

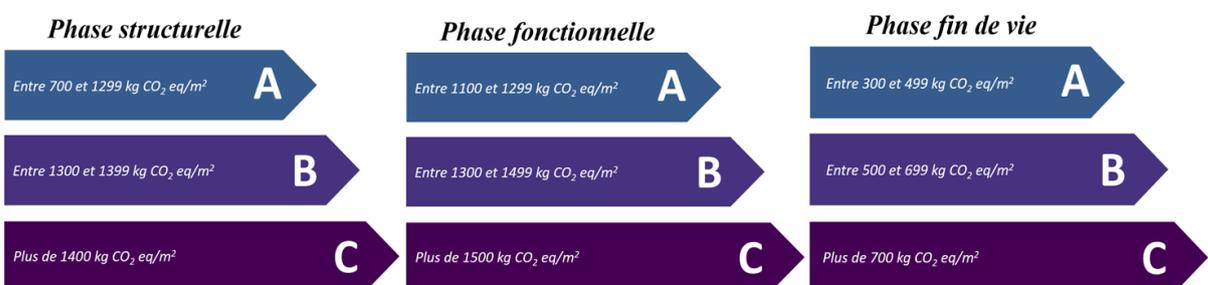


FIGURE 5.17 – Étiquettes pour l'évaluation environnementale des espaces bâtis (IMM) en 2030 en milieu insulaire - Cas de la Réunion

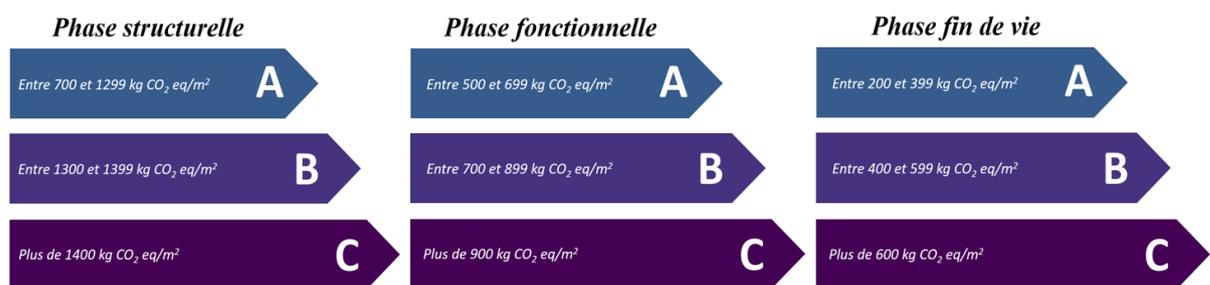


FIGURE 5.18 – Étiquettes pour l'évaluation environnementale des espaces bâtis (IMM) en 2050 en milieu insulaire - Cas de la Réunion

### **5.3.5 Conclusion**

Ce chapitre V s'est présenté en deux sections distinctes : la première partie de ces travaux a mis en évidence une approche simplifiée pour évaluer les bâtis classiques à partir du couplage d'une loi et d'une méthodologie : PARETO/ACV.

Les résultats ont permis de rendre l'approche ACV accessible aux différentes équipes professionnelles et acteurs locaux, et ce, du fait que cinq à huit matériaux de construction ou produits expliquent de manière adéquate entre 78 et 95% de l'impact environnemental d'une maison individuelle à la Réunion.

Cette première approche simplifiée permet ainsi de démocratiser l'ACV et permet également que l'étude environnementale puisse se faire dans un temps bien plus court que lors d'une étude ACV complète et détaillée.

La seconde partie de ce chapitre a été dédiée à la création d'un indicateur composite environnemental, dans l'objectif d'atteindre une synthétisation des métadonnées.

Ainsi, cet indicateur environnemental a permis à la fois de simplifier l'information et de proposer un seuil d'impact qui est applicable aux constructions locales et non au contexte des constructions nationales .

Le recours et l'intérêt de créer cet indicateur composite nous as permis d'évaluer rapidement les performances environnementales des bâtis étudiés. Comme nous l'avons également souligné dans nos travaux, l'indicateur composite nous as permis également de considérer plusieurs indicateurs, en plus du GWP qui est largement utilisé surtout pour les bilans carbone et non pas pour l'évaluation des impacts environnementaux en général, qui comprend d'autres indicateurs aussi importants mais beaucoup moins connus et abordés.

L'ensemble des travaux de ce chapitre, ont permis également dans un troisième temps, de définir les seuils pour l'évaluation des performances environnementales des bâtis en milieu insulaire.



# Définition d'un nouveau paradigme de durabilité d'un bâti

---

## Sommaire

---

<b>6.1</b>	<b>Questionnement sur la définition de la durabilité d'un bâtiment</b>	<b>130</b>
6.1.1	Le bâtiment durable : un concept en évolution . . . . .	130
6.1.2	Vision du bâtiment durable à partir d'une approche globale d'un système complexe . . . . .	136
<b>6.2</b>	<b>De la définition d'un nouveau paradigme de durabilité d'un bâti</b>	<b>138</b>
6.2.1	L'ACV : un nouveau regard sur la durabilité des bâtiments . . .	138
6.2.2	La place de l'économie verte dans la durabilité des bâtiments	139
6.2.3	Limites locales . . . . .	140
6.2.4	Le concept de durabilité au sens large du terme . . . . .	141
6.2.5	Conclusion . . . . .	142

---

**D**ANS ce dernier chapitre, nous nous intéressons au concept de "durabilité d'un bâti". En effet, cette notion est encore aujourd'hui confuse et imprécise, malgré les innombrables tentatives de mesures et de propositions faites depuis plusieurs années à différentes échelles. Ce concept global, souvent associé à la question "Green BUilding" est encore trop peu évaluée. Les acteurs du secteur du bâtiment tentent encore trente ans plus tard, de traduire cette notion complexe. Il y a donc urgence à poser un socle de base évolutif qui permettra la prise en compte d'indicateurs et de champs transversaux en fonction des conditions circonstancielle futures. Nous proposons ici un socle sur lequel, les aspects que nous considérons sont importants et indispensables pour définir ce qu'est un bâtiment "durable".

## 6.1 Questionnement sur la définition de la durabilité d'un bâtiment

### 6.1.1 Le bâtiment durable : un concept en évolution

#### 6.1.1.1 Définitions

Le concept de durabilité est aussi vieux que l'humanité : il s'agit tout simplement de se soucier du devenir de nos ressources. Le mot lui-même apparaît pour la première fois dans un manuel de foresterie en 1713, sous l'appellation allemande originale "Nachhaltigkeit" signifiant "rendement soutenu". Il fait alors état d'une gestion raisonnée des prélèvements des forêts qui ne mettent pas en péril l'auto-régénération de cette dernière [Spindler 2013].

La notion de durabilité traduite en anglais est évoquée pour la première fois par les travaux de Jevons en 1866, à travers "The coal question" [Jevons 1866]. C'est l'une des premières fois qu'on se questionne sur la durabilité d'un système, à savoir l'industrie britannique à l'époque, au prisme d'une ressource fossile qu'était le charbon. L'auteur s'interrogeait sur le caractère soutenable d'un développement industriel uniquement basé sur le charbon. Il enquête alors sur le progrès de la nation et le possible épuisement du charbon. Ce sont ainsi les prémices des questionnements autour de la notion de durabilité d'un système.

Le concept plus moderne de développement durable remonte quant à lui aux années 1970. Il a évolué après la publication de « The Limits to Growth » par le Club de Rome [Meadows 2013]. Quelques années plus tard en 1987, la Commission de Brundtland formalise à travers une définition aujourd'hui largement reprise la notion de développement durable comme étant *un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs*.

Le concept de durabilité environnementale, quant à lui, est apparu bien plus tard, au cours de ces trente dernières années. Depuis, la durabilité est devenue une priorité pour le développement socio-économique de la société mondiale. La croissance rapide qui a suivi la Seconde Guerre mondiale a posé les bases d'un développement non durable à la fois d'un point de vue social et environnemental [WCED 1987]. Cette problématique s'invite dans de nombreux champs (énergie, alimentation, transport, construction...). C'est pourquoi, à la fin du siècle dernier, la question de construire plus écologiquement responsable a commencé à émerger. Ainsi, les acteurs du secteur de la construction ont préconisé petit à petit le développement de « bâtiments verts ». Ces derniers devaient être déconnectés des réseaux de services et fabriqués avec des matériaux naturels [Kibert 2012].

En plus de cette déconnexion des réseaux et des fabrications à partir de matériaux naturels, un autre paramètre est également pris en compte, celui de la performance énergétique des bâtiments (thermique, éclairage) . Il est toujours très utilisé pour

discuter de la durabilité d'un bâtiment [Cole 2005, Berardi 2012, Schwarz 2020]. Cependant, les bâtiments durables sont souvent confondus avec les bâtiments efficaces sur le plan énergétique [Berardi 2013a].

Il existe également d'autres paramètres et approches qui sont considérés dans l'évaluation des « bâtiments verts » ou dits « durables ». Brundtland oriente ce terme de « durabilité » vers une perspective à long terme, c'est-à-dire intergénérationnelle. D'autres auteurs suggèrent plutôt d'adopter une approche qui soit dynamique en considérant les processus transformables vers la durabilité, car elle évolue continuellement [Bagheri 2007].

Une troisième approche, peut également être prise en compte : celle de la dépendance spatiale. En effet, le concept de durabilité peut se baser également sur cette dépendance spatiale. Comme l'affirment Brand et Karvonen, « la durabilité est spécifique au niveau local et relève davantage de l'interprétation locale que d'un objectif universel » [Brand 2007]. Ce concept peut également prendre en compte d'autres dimensions telles que culturelles et politiques selon les objectifs visés lors des projets [Vallance 2011, Hopwood 2005]. Les différentes approches et définitions que nous venons de voir ci-dessus ont divisé le concept de durabilité et ce concept a pendant longtemps considéré et évalué exclusivement les dimensions environnementale et énergétique (matériaux naturels, transition énergétique...) [Huetting 2004], laissant ainsi les autres aspects de la durabilité de côté [McDonough 2002].

Aujourd'hui, il existe de nombreux termes pour tenter de définir la durabilité dans le bâtiment. On entend parler de « construction durable » de « bâtiment durable », de « construction verte » ou encore « d'écoconstruction ». Ces termes traduisent la volonté de répondre aux enjeux du changement climatique et de la raréfaction des ressources, mais aussi de favoriser la santé et le bien-être des occupants.

Dans la littérature, peu de définitions du bâtiment durable sont proposées. Cependant, nous retrouvons quelques définitions de ce concept à travers des revues et des ouvrages. Cependant, ces définitions semblent assez incomplètes, peu claires et biaisées [Cole 2005, Fowke 1996].

Contextualiser la durabilité des bâtiments n'est pas chose facile. Il ne s'agit pas de considérer le volet environnemental seul, ou les volets énergétique, social et économique. Cette notion de durabilité va au-delà de ces quatre paramètres réunis. Ce qui rend complexe la définition précise de ce concept est notre capacité à identifier des variables quantitatives permettant de mesurer les performances d'un bâtiment selon les thèmes retenus.

L'évaluation de la durabilité des bâtis passe aujourd'hui par des outils de mesure présents dans la littérature. Ces outils contribuent à accroître la sensibilité aux critères et aux objectifs de durabilité [Berardi 2012, Kennedy 2012].

Selon plusieurs auteurs, « *un bâtiment est durable s'il représente un environnement bâti sain, basé sur des principes écologiques et une efficacité des ressources* » [Brown 1997, Kibert 2016]. Selon d'autres auteurs, la définition d'un bâtiment du-

rable doit également prendre en compte « une efficacité élevée dans l'utilisation de l'énergie, de l'eau et des matériaux, et des impacts réduits sur la santé et l'environnement tout au long de son cycle de vie » [Cassidy 2003, Brightman 2008].

Ce concept de bâtiment durable dépasse la perspective environnementale selon Reed. Il considère le bâtiment comme un système vivant avec des flux en interaction permanente avec la nature [Myers 2007]. En effet, il propose de « passer d'une conception écologique à une conception régénérative qui tient compte de l'évolution du bâtiment dans la nature de manière systémique ».

Selon Berardi, O., « le bâtiment durable peut être un chemin caractérisé par des contraintes et des incertitudes : cela montre qu'une définition du bâtiment durable est difficile parce que le temps, l'espace, le secteur et les contraintes sociales augmentent les incertitudes dans l'identification de la durabilité dans l'environnement construit ». Cet auteur souligne notamment que les facteurs montrent que la durabilité implique un taux constant d'incertitudes et suggère qu'il s'agit davantage d'un chemin de transition que d'une étiquette donnée à un bâtiment [Berardi 2013a].

Aujourd'hui, face à l'urgence climatique, agir est une obligation, on ne s'inscrit plus dans une logique de dynamique ou de transition uniquement, mais nous sommes amenés à "acter" à travers la définition et l'application des seuils de performance de durabilité. Ce sont des outils et méthodes qui doivent aujourd'hui être mis en œuvre et à disposition des acteurs du secteur du bâtiment.

Nous avons également recensé les termes, notions associées et définitions décrites par différents organismes et fédérations nationales ou locales. Pour ces derniers, *la construction durable est la construction ou la rénovation qui, tout en assurant la qualité de vie des occupants, maîtrise ses impacts sur l'environnement et assure une performance énergétique optimale, en utilisant autant que possible les énergies renouvelables et les ressources naturelles et locales* [FFB 2021]. Les démarches de la FFB se concentrent principalement autour :

- d'une économie d'énergie avec la qualification RGE<sup>1</sup> ;
- des chantiers à faibles nuisances avec la démarche « bâtir avec l'environnement » ;
- d'une bonne gestion des déchets de chantier (avec application smartphone dédiés aux déchets du BTP) ;
- ou encore de la qualité de l'air intérieur.

Selon la fédération, le terme du « bâtiment durable », n'est pas défini de façon explicite. Nous constatons que ce dernier reste toujours aussi imprécis au fil des années. Selon Batimat, la notion de bâtiment durable relève cependant de trois dimensions [BATIMAT 2021] :

- Une dimension humaine, car il y a vocation à assurer le confort des occupants ;

---

1. RGE : Reconnu Garant de l'Environnement

- *Une dimension environnementale*, par rapport au choix des matériaux, en privilégiant les ressources naturelles et renouvelables ;
- Et *une dimension énergétique*, où la consommation d'énergie doit être réduite au maximum.

Selon le site Infociments, la construction durable *consiste à limiter l'impact des bâtiments sur l'environnement, tout en le garantissant une qualité supérieure en matière d'esthétique, de durabilité et de résistance. Elle prend en compte tout le cycle de vie des ouvrages, du choix des produits initiaux jusqu'à leur démolition et recyclage. Construire durable signifie notamment : utiliser des matériaux recyclables pour préserver les ressources naturelles, optimiser l'inertie thermique des bâtiments, intégrer des sources d'énergies renouvelables dans la conception d'un bâtiment* [Infociments 2021].

Ces multiples définitions tentent de traduire le terme complexe qu'est le concept du bâtiment durable. Le bâtiment performant quant à lui, a été pendant longtemps attaché à la domotique et l'automatisme, ainsi que la gestion de l'énergie des bâtiments. L'enjeu a toujours été soit dans la maîtrise ou la gestion d'un bâtiment.

### 6.1.1.2 Limite temporelle

La durabilité environnementale d'un bâti est dans la plupart des cas évaluée à l'instant  $t$ , avec un seul horizon temporel. La prise en compte des bâtiments dans l'ensemble de leur cycle de vie est assez difficile à prévoir car les bâtiments peuvent exister beaucoup plus longtemps que prévu [Du Plessis 2011]. Le comportement des matériaux dans le temps vis à vis des conditions climatiques n'est pas toujours clairement connu. L'intervalle de temps dans lequel l'évaluation de la durabilité d'un bâtiment est effectuée dépend du moment de l'évaluation mais aussi des connaissances qui sont disponibles à ce moment-là.

L'absence de référentiel d'évaluation clairement posé fait qu'un bâtiment défini comme durable il y a dix ans, ne l'est plus forcément aujourd'hui. Il faut alors poser un socle évolutif ayant un cadre minimal à l'évaluation de la durabilité d'un bâtiment. L'idée générale serait de laisser exister ce socle initial dans le temps et y ajouter des indicateurs supplémentaires en fonction des évolutions des conditions circonstancielles futures.

Pendant longtemps les mesures mises en place ont été surtout très déclaratives, sans être vraisemblablement des engagements réels, excepté à l'accord de Paris, où il y a eu une volonté d'engagements qui devaient se traduire en actes. Mais plusieurs années plus tard, on constate que cet accord est encore perfectible. La loi fixe bien le cap et les objectifs à atteindre, mais il manque la réglementation sectorielle qui permettrait un déploiement opérationnel des ambitions. Cette réglementation est arrivée tardivement, expliquant notre situation où nous sommes ambitieux mais sans avoir les outils pour mener à bien cette transition.

Il existe une inertie entre les mesures prises et les actions qui doivent être appliquées sur notre territoire. Plusieurs cadres et plans ont été mis en place à échelle nationale (SNBC), pouvant être applicable à échelle de notre territoire seulement s'il y a une adaptation :

- la PPE qui envisage l'intégration de 33% d'énergies renouvelables d'ici 2030 ;
- la loi énergie-climat en 2019 qui propose une réduction de 40% de la consommation d'énergies fossiles en 2030 par rapport à 2012 ;
- et le plan climat en 2017 qui est un renouvellement de l'ambition vers la neutralité carbone à horizon 2050 ;

Toutes ces mesures incitatives et applicables depuis plusieurs années maintenant ne peuvent répondre dans l'immédiat à l'urgence climatique et ne semble pas produire des résultats observables encourageants dans le cas de la France.

De plus, de par les nombreuses adaptations et réhabilitations que peut subir un bâtiment au cours de son cycle de vie, des concepts portant sur la flexibilité et l'adaptabilité existent depuis plusieurs années maintenant et sont connus pour être des aspects fondamentaux pour un bâtiment durable. Ce dernier doit être capable de s'adapter aux nouvelles exigences réglementaires mais aussi à l'évolution de son environnement. Ainsi, un bâtiment durable devrait donc augmenter la résilience de l'environnement bâti en s'adaptant au métabolisme de son contexte environnemental.

Dans la continuité des lois Grenelles 1 et 2 et de la LTECV, la loi anti-gaspillage économie circulaire (AGEC) de février 2020, prévoit pour 2022-2023 la mise en place d'une filière REP<sup>2</sup> bâtiment. Cette filière permettrait aux producteurs d'améliorer la captation des déchets du bâtiment par les filières légales de traitement en vue de leur valorisation et éviter ainsi la formation de dépôts sauvages.

Au plan régional, dans le cadre de la loi NOTRe (Nouvelle Organisation Territoriale de la République), un plan unique déchet intitulé "Plan Régional de Prévention et de Gestion des déchets" (PRPGD), a été initié par la Région Réunion en 2017. Le PRPGD dresse un état des lieux des déchets produits, et intègre une planification prospective de prévention et de gestion des déchets en cohérence avec un plan régional d'actions en faveur d'une économie circulaire.

### 6.1.1.3 Limites liée à l'échelle

Les bâtiments sont en interaction avec leur environnement, ce qui rend l'attribut « durable » délicat. Il est difficile de définir un bâtiment en terme absolu. L'importance de son interaction avec son environnement est de plus en plus reconnue, surtout dans les systèmes d'évaluation de la durabilité à l'échelle des quartiers

---

2. Responsabilité Élargie des Producteurs

[Berardi 2013b]. En effet, les interconnexions d'un bâtiment avec les infrastructures environnantes sont de plus en plus reconnues comme des aspects incontournables d'un bâtiment durable [Berardi 2011]. Les évaluations de la durabilité et les limites des interconnexions entre un bâtiment et son environnement rendent la dépendance spatiale de la durabilité incertaine au niveau de l'échelle.

### 6.1.1.4 L'écoconception et les systèmes actifs

Au sein de notre laboratoire, les travaux ont porté pendant près de 15 à 20 ans sur les problématiques de simulation thermique du bâtiment, dans un objectif de concevoir des bâtiments adaptés en milieu subtropical.

L'un des axes majeurs de notre laboratoire a été de contribuer à la recherche des bâtiments devant être à la fois confortable pour les occupants, en proposant des solutions efficaces face aux systèmes actifs, en privilégiant la ventilation naturelle, et aussi face à la réduction de la consommation du bâtiment en énergie, tout en tenant compte des conditions climatiques tropicales.

Au fil des années, les réglementations et labels sont apparus, tels que le label HQE, qui aujourd'hui est traduit par le dispositif « E+C- ». Il y a une évolution à cela : celle d'une logique de durabilité d'un bâtiment autonome. La consommation en énergie du bâtiment doit être effacée. Le PV<sup>3</sup> peut compenser cette consommation d'énergie.

Pendant longtemps, la construction des bâtiments a été suivie d'installations des PV sur les toitures. On pouvait alors parler de bâtiment à énergie positive. Aujourd'hui, on ajoute le « C - », la seconde partie du dispositif, ou le bâtiment doit impacter le moins possible. Il doit avoir un impact carbone le plus bas possible dans sa mise en œuvre. On vise ainsi des bâtiments hautement efficient du point de vue énergétique et à faible impact environnemental.

### 6.1.1.5 Les lois et réglementations mises en place

L'Etat accompagne les acteurs et professionnels locaux à trouver des solutions face aux problèmes environnementaux. Dans le secteur du bâtiment, la loi AGEC a été promulguée en février 2020. Cette loi entend accélérer le changement de modèle de production et de consommation afin de limiter les déchets et préserver les ressources naturelles, la biodiversité et le climat [Ecologie.gouv 2021].

Dans notre secteur, les mesures entrent en vigueur à partir du 1er Janvier 2022. La loi du 10 Février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire tend vers un système de consommation linéaire : *produire, acheter, consommer, jeter*. Cela s'effectue à travers cinq axes majeurs :

---

3. panneau photovoltaïque

- la disparition des objets en plastique à usage unique ;
- l'information des consommateurs ;
- la lutte contre le gaspillage et l'encouragement du réemploi solidaire ;
- la lutte contre l'obsolescence programmée ;
- la production plus respectueuse de l'environnement.

La loi AGEC, à créer onze nouvelles filières qui relèvent de la responsabilité élargie des producteurs (REP), qui sont également appelés « filières pollueurs-payeurs ».

L'article L.541-10 du code de l'environnement définit le producteur comme étant *toute personne physique ou morale qui élabore, fabrique, manipule, traite, vend ou importe des produits générateurs de déchets ou des éléments et matériaux entrant dans leur fabrication*. S'ajoutent également les produits et matériaux de construction ou de démolition destinés aux particuliers ou aux professionnels dans la catégorie des REP.

Les seuls matériaux qui peuvent échapper à ce nouveau régime sont les déchets réutilisables, à l'instar du bois, du métal, du plastique ou encore du verre. Nous noterons que pour bénéficier de cette exception, les déchets devront être triés sur le chantier par un professionnel.

Ce nouveau régime implique donc que les acteurs du bâtiment relevant de la définition de producteur au sens de la loi AGEC doivent faire face à des obligations qui vont bien au-delà des normes applicables à la gestion des déchets de chantier actuellement. Parmi les obligations prévues, un plan d'action de prévention et d'éco-conception devra être élaboré tous les cinq ans. Ce dernier se décompose en 3 axes : *résumé du bilan – objectifs fixés – et actions à mener*. Il permettra ainsi d'augmenter l'utilisation des matériaux recyclés et de favoriser le recyclage.

## **6.1.2 Vision du bâtiment durable à partir d'une approche globale d'un système complexe**

### **6.1.2.1 Comparaison entre l'impact environnemental d'une maison individuelle à partir de matières premières versus de matières premières secondaires**

Nous présentons dans cette section, l'impact environnemental d'une maison individuelle (MI) selon deux configurations (I) et (II) : une première construite à partir de matières premières extraites de divers pays étrangers tel que pratiqué actuellement, une prise en compte du fonctionnement d'un bâti à partir du mix électrique carboné et d'une fin de vie où les matériaux sont majoritairement exportés ou enfouis. Cette même maison est évaluée une seconde fois (II), cette fois-ci à partir d'un mélange de

matières premières secondaires locales et de matières premières standards, une prise en compte du fonctionnement d'un bâti en tenant compte de la décarbonisation du mix électrique local dans le temps, et d'une fin de vie où une partie des déchets sont recyclés, réutilisés, et peu exportés ou enfouis.

Dans ces travaux, nous avons introduit volontairement l'approche de matériaux biosourcés dans le cas (II), la décarbonisation du mix électrique et la prise en compte d'une économie verte en fin de vie. On entend par « économie verte » la capacité de l'île à récupérer les déchets des bâtiments en fin de vie, à les transformer et à les réutiliser en tant que matières premières secondaires pour la construction d'autres bâtiments.

Les premiers résultats montrent que l'impact environnemental de cette maison (I) est plus important que lorsqu'elle est prise en compte avec des choix différents dans le cas (II), aux phases structurelles, fonctionnelles et fin de vie 6.1.

En effet, le cas (I) correspond aux constructions, aux fonctionnements et aux fins de vie actuels des MI. Cependant, lorsque nous prenons le cas (II), où des efforts et des choix sont effectués (en tenant compte des contraintes de l'île), nous constatons tout de même un meilleur impact pour les 3 phases.

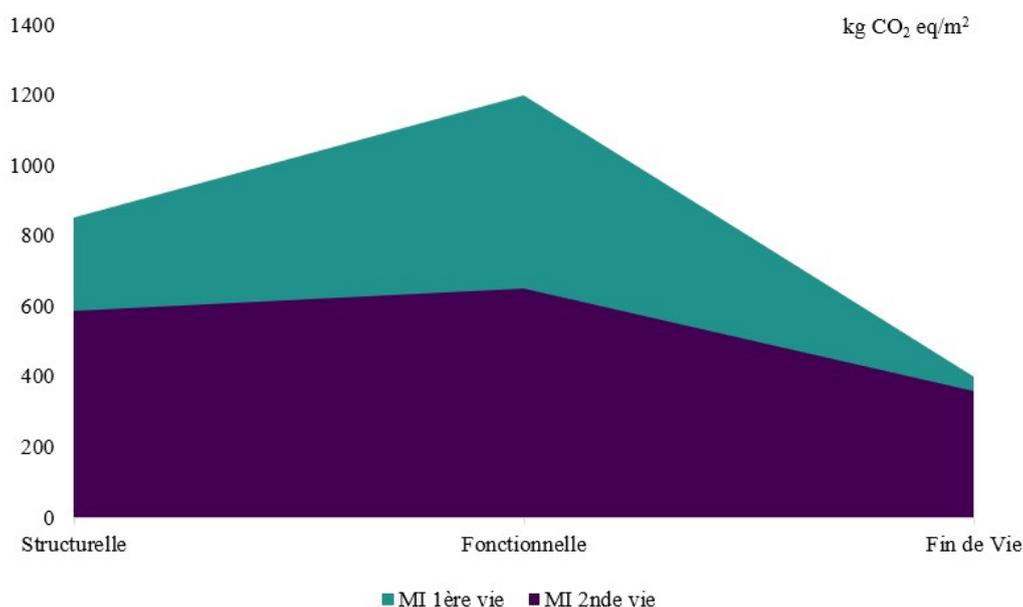


FIGURE 6.1 – Comparaison de l'impact environnemental d'une MI selon deux configurations

L'aspect structurel du cas (II) prend en compte 30% de matériaux et produits qui sont issus d'un premier cycle de vie d'une maison de cas (I). Ces matières premières secondaires ont été en partie recyclées et utilisées, donc transformées. Les émissions

liées à la transformation et au transport sont bel et bien moins importantes que si l'intégralité des matériaux et produits devraient être importés à plus de 80 à 90% comme c'est le cas actuellement.

L'île étant très importatrice (à plus de 80%) et peu exportatrice (à peine à 20%), se doit dans ce contexte d'urgence climatique et de transition énergétique, de trouver des solutions pour diminuer massivement ses importations de marchandises par voie maritime, tous secteurs confondus.

Étant conscients que même si l'île tend vers des ressources locales et une importation moins massive, cela ne permettra malencontreusement pas de répondre à 100% des besoins de la population grandissante. De facto, il serait indispensable d'avoir un mix ou on privilégierait des matières premières secondaire, puis des matériaux issus de ressources locales, sans que ces derniers ne s'épuisent complètement.

## **6.2 De la définition d'un nouveau paradigme de durabilité d'un bâti**

### **6.2.1 L'ACV : un nouveau regard sur la durabilité des bâtiments**

Encore récemment, la durabilité des bâtiments ne concernait que la phase structurelle avec la genèse des matériaux ou encore la phase opérationnelle des bâtiments en lien avec l'efficacité énergétique. Cependant, étant donné que 70% de tous les matériaux extraits se trouvent dans un bâtiment, il y a eu une prise de conscience sur le fait que la durabilité des bâtiments doit prendre en compte des matériaux dans une perspective à long terme. Ainsi, les approches ACV allant du berceau au berceau et de la fin de vie sont de plus en plus adoptées lors de l'évaluation de la durabilité des bâtis [McDonough 2002].

Compte tenu de la demande grandissante des évaluations environnementales des bâtis à long terme, ou encore des évaluations d'impacts multi-échelles et de critères multi-domaines, un nouveau paradigme des « bâtiments durables » a débuté son émergence. Selon cette définition, un bâtiment, en plus d'être conçu et exploité avec une aptitude appropriée à l'utilisation avec un impact environnemental minimal, doit contribuer à encourager les améliorations vers une forte durabilité [Berardi 2011]. Les premiers jalons de ce concept représentent une première évolution significative par rapport à une simple approche environnementale.

Lorsque nous faisons un focus sur l'aspect du bâtiment durable, nous constatons que le bâtiment durable prend en compte la qualité de vie des occupants, mais aussi la performance énergétique optimale. Cependant, la réduction des émissions carbone reste encore légèrement peu abordée.

Dans la vision qui est la nôtre, la durabilité d'un bâtiment est une approche plutôt holistique, devant considérer l'ouvrage dans son ensemble, allant de la fabrication

des matériaux à la déconstruction d'un bâtiment en fin de vie. Cette nouvelle approche globale que nous abordons dans ce chapitre convient de prendre en compte non seulement le choix des matériaux, de la maîtrise de l'énergie du bâtiment lors de son fonctionnement, mais aussi et surtout de sa capacité à « se recycler » en fin de vie, pour permettre une réutilisation maximale de ses « déchets » en matières premières secondaires pour un nouvel usage dans le secteur du BTP par exemple.

Nous entendons par « s'autorecycler », la capacité d'un bâtiment en fin de vie à disposer d'une grande quantité de déchets susceptibles de devenir des matières premières secondaires et servir ainsi à la construction d'un nouveau bâtiment. Les matières premières qui auront été soigneusement choisies pour la construction d'un bâti, serviront tout ou partie de matières premières secondaires pour la construction d'un bâti neuf trente ans plus tard.

Dans nos travaux, nous tentons, à travers le dispositif « E+C- » de mettre en évidence, le fait de bien agir dans la mise en œuvre du bâtiment mais aussi dans son fonctionnement. Nous parlerons alors non pas de « E+C- » mais plutôt de  $E^+C^+C_-$ , qui prend en compte plutôt l'énergie (E+), le confort thermique (C+) et le carbone (C-). C'est à partir de la combinaison de ces thématiques et celles du développement durable que nous sommes venu situer la redéfinition du paradigme de durabilité d'un bâtiment, que nous présentons à la fin de ce chapitre.

### **6.2.2 La place de l'économie verte dans la durabilité des bâtiments**

L'économie circulaire est une composante clé d'une économie plus responsable environnementalement. Ce type d'économie est aujourd'hui un point d'ancrage fort dans la phase de fin de vie d'un bâti, surtout dans le concept de durabilité d'un bâtiment. Une économie circulaire comprend le recyclage des déchets, le privilège des circuits courts et de l'utilisation des matériaux recyclés.

Cependant, un problème de taille se pose à la Réunion : la faible quantité de production des déchets fait que la structuration de filières de revalorisation de ces déchets peut s'avérer problématique. En effet, la taille du marché peut s'avérer trop petite pour garantir la soutenabilité financière de la filière. Cette faible production de déchets et ce développement fragile en recyclage amène à un maillage encore trop délicat pour des installations de collecte à proximité. De plus, la faible prise en charge en direction des entrepreneurs de bâtiment multiplie les exemples de dépôts illégaux accueillant les rebus des chantiers en cours. La Réunion ne produit pas assez de déchets de BTP pour pouvoir installer des sites de recyclage de grande envergure. La tendance actuelle est au développement d'installations de petite ou moyenne envergure.

L'économie circulaire cible également des circuits courts : un circuit court permet la diminution des GES grâce à la réduction des distances, ce serait un

gain en efficacité, cela permettrait d'avoir de la valorisation en ressources locales, et des constructions durables à un coût plus juste et soutenable dans le temps. Les circuits courts peuvent être pris en compte lors de l'approvisionnement des matériaux de construction et produits en local, lors de l'attribution des chantiers à des entreprises locales, lors de l'élimination des déchets de chantier vers des centres de valorisation à proximité. Ces circuits courts peuvent être considérés comme des filières traditionnelles dans certains territoires et certaines régions où le développement local pousse à de nouveaux savoir-faire tel que l'utilisation de matériaux biosourcés. Actuellement à la Réunion, une grande partie des déchets est expédiée vers l'extérieur, faute de capacité de l'île à traiter l'intégralité de ses déchets divers. Dans la logique de développement durable, l'orientation vers une relocalisation des filières induit nécessairement un impact sur l'emploi et l'économie locale. On touche ainsi aux autres piliers d'un développement soutenable de nos territoires.

### 6.2.3 Limites locales

La récente pandémie mondiale a exacerbé notre vulnérabilité sur bien des aspects : approvisionnement énergétique, de marchandises ou encore alimentaire. A contrario, les différents coups d'arrêt de l'activité économique mondiale dûs aux différents confinements a mis en évidence l'importante diminution de l'impact environnemental dès l'arrêt des activités anthropiques, et ce, de façon indéniable.

A la Réunion, certains matériaux se font rares, et cela remonte à bien avant la crise sanitaire mondiale. Cette raréfaction des matériaux entraîne une hausse de leur prix, à l'image de l'acier, dont le coût a augmenté de +30% ces derniers mois. C'est un constat critique pour les différents acteurs du secteur du bâtiment. La raréfaction des matériaux ne facilite pas les chantiers et posent problèmes du fait de risquer l'arrêt de certains chantiers, faute de matériaux.

En effet, l'inflation observée au niveau du prix des nombreux matériaux tels que le cuivre ou l'acier, ou encore le bois de structure a amené un ralentissement dans le secteur du bâtiment du fait du surcoût économique induit. Non seulement nous sommes sur une augmentation de 200 à 250% pour le bois, et à plus de 400% d'augmentation pour le fret maritime des matériaux et produits arrivant tout droit de l'Asie, selon le [Ovango 2021]. En plus de la crise sanitaire qui a désorganisé les différentes filières d'approvisionnement, il y a eu également d'autres facteurs tels que le redémarrage soudain de l'activité des chantiers, qui a contraint les entreprises réunionnaises à se fournir en matériau rapidement, pour redémarrer la suite des constructions, ce qui a entraîné la hausse des prix.

A la Réunion, l'une des solutions à court termes des entreprises locales, a été de se rabattre sur un autre fournisseur plus proche, avec des prix qui ont été 20% plus

chers. Ces impacts économiques fragilisent fortement la filière BTP à la Réunion, mettant ainsi en exergue une vulnérabilité forte de notre territoire du fait des apports exogènes trop nombreux pour le secteur de la construction.

#### **6.2.4 Le concept de durabilité au sens large du terme**

*Comment a-t-on questionné la durabilité environnementale dans ce doctorat ?*

La première pierre du repositionnement d'un paradigme de durabilité d'un bâtiment a été initié par notre « regard environnemental », qui s'est focalisé sur la phase structurelle du bâtiment. Nous avons placé des indicateurs au cœur de cette évaluation environnementale dans le but de mesurer la durabilité des bâtiments. Nous avons par la suite objectivé le choix des matériaux et produits, dans le but de diminuer les impacts environnementaux et avoir une empreinte carbone moins importante.

Aujourd'hui, le choix d'un matériau doit se faire non pas en fonction de son impact en phase structurelle mais plutôt sur l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment. Le fait de choisir un matériau juste parce qu'il a un impact de production et de construction faible, ne lui confère pas nécessairement l'épithète de  *durable*.

C'est pourquoi, la seconde pierre de ce repositionnement a porté sur « l'intégration de la durabilité sur l'ensemble de cycle de vie total du bâtiment ». En effet, les phases structurelle, fonctionnelle et fin de vie sont considérées en temps voulu. La question a été de savoir « que fait-on d'un bâtiment qui atteint sa fin de vie ? » Nous soulignons ici la corrélation forte qui existe entre le choix initial du matériau qui est fait au départ d'une construction qui influence automatiquement la fin de vie du bâtiment, d'où la nécessité d'évaluer les bâtiments dans leur ensemble de cycle de vie afin d'anticiper leur fin de vie.

La liaison de ces deux étapes nous a amené à une situation qui semble être antinomique : d'un point de vue environnemental on le soulignerait par le fait de la capacité du bâtiment à se valoriser. Cette capacité amènerait en phase de projet d'une première vie à choisir certains matériaux qui pourraient avoir un impact environnemental en phase structurelle plus conséquent. Toutefois un choix judicieux de matériau permettrait d'avoir une plus grande capacité de revaloriser des éléments du bâtiment en fin de vie. On se doit de considérer deux points, toujours au prisme de limitation d'une empreinte environnementale :

- premièrement être capable de revaloriser le plus possible les déchets issus du bâtiment ;
- deuxièmement, que les filières retenues aient le moins d'impacts possible notamment en termes de consommation énergétique ;

Ainsi, leur impact dans la seconde vie d'un bâti serait moins impactant que dans une première vie. Dès lors, notre approche est tout d'abord de définir dans un premier

temps la durabilité d'un bâtiment avec une forte connotation environnementale. La notion repose sur plusieurs thématiques. Si on ramène cela au secteur du bâtiment, la durabilité définit les caractéristiques environnementales d'un système, mais elle ne se limite pas uniquement à une lecture environnementale. Une lecture purement environnementale introduit un biais dans les analyses et choix de matériaux.

Les piliers ou thématiques que nous avons soulignés dans la section précédente nous mène à proposer ici cinq aspects que nous qualifions d'utiles et indispensables, que nous avons représenté sous forme de « pentagone », Figures 6.2, 6.3, 6.4.

Le découpage de ces pentagones a été réalisé sur une échelle allant de 1 à 5 (valeur minimale/maximale) et décomposé de la manière suivante :

- Étiquette A : > 4;
- Étiquette B : Entre 3 et 4;
- Étiquette C : Entre 2 et 3;
- Étiquette D : < 2.

Nous avons représenté à travers ces pentagones, trois configurations illustratrices, ou on propose :

- une première configuration : ou il y a une haute performance de la durabilité d'un bâtiment en le notant 5A ou AAAAA;
- une seconde configuration : ou cette fois-ci le bâtiment est moins performant mais il garde une certaine homogénéité sur l'ensemble des piliers. Des points d'améliorations sont envisagés : ce bâtiment est noté 4B1C ou BBBBC;
- Et une troisième configuration : ou on note que la durabilité du bâtiment est très dichotomique, et ou son score est moins bon. En effet ce bâtiment a un profil de type 2A1B2D ou AABDD. Ce type de profil met en évidence les choix de la maîtrise d'ouvrage de mettre l'accent sur certains aspects de performances au détriment de certains autres.

L'objectif est alors d'arriver à des bâtiments équilibrés dans la définition du nouveau paradigme de durabilité d'un bâti.

Ces schémas englobent ainsi les piliers que nous jugeons nécessaires à considérer pour définir globalement le concept de durabilité d'un bâtiment aujourd'hui. Cette approche permettrait ainsi de s'appuyer sur une visualisation de l'efficacité du projet sur l'ensemble des thématiques. On retrouve aujourd'hui cette approche, par exemple, dans les cercles de soutenabilité [Paul James 2015].

### **6.2.5 Conclusion**

L'examen de la terminologie de durabilité montre bien la nécessité d'une approche transdisciplinaire mais également multi-échelle. En effet, le concept de durabilité doit s'attacher également à une approche multi-scalaire. Dès lors le bâtiment

*1ère configuration :*

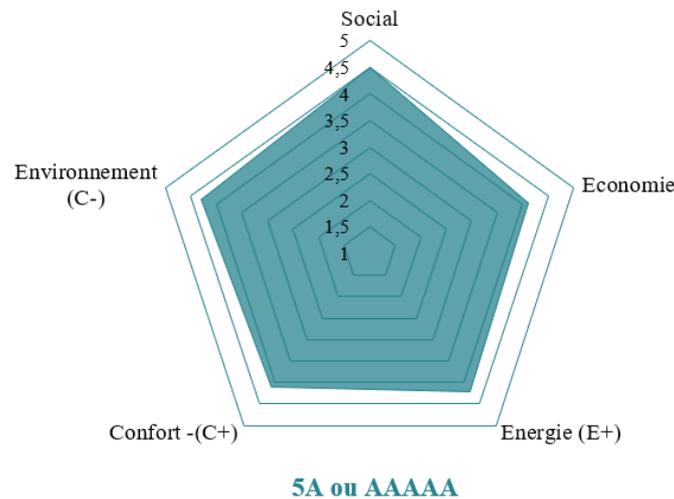


FIGURE 6.2 – Définition du concept de durabilité d'un bâtiment selon cinq thématiques - Première illustration de profil possible

peut être qualifié de durable lorsque ce dernier contribue positivement à la durabilité de son environnement.

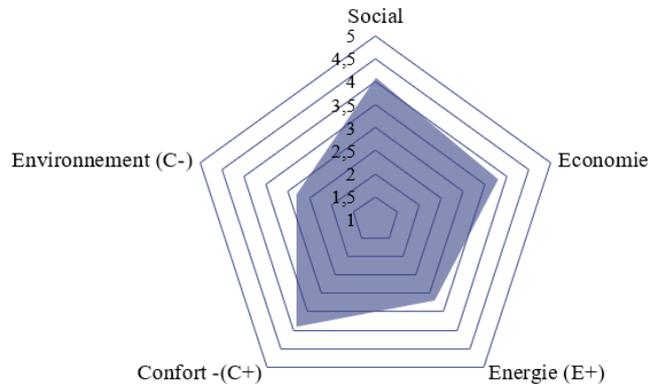
L'un des aspects qui est pris en compte depuis quelques temps, est le choix des matériaux de construction et produits. C'est un élément indispensable pour les futurs bâtiments. Ces derniers doivent participer à la performance énergétique et garantir un environnement sain pour les utilisateurs.

La minimisation des impacts environnementaux passent également par une localisation des approvisionnements. Ce choix s'avère particulièrement contraignant dans le cas d'un petit espace insulaire. En effet, les ressources exploitables sont souvent peu diversifiées compte tenu du jeune âge des territoires (en comparaison avec les continents). De plus les stock arrivent rapidement à épuisement.

Le concept de durabilité englobe plusieurs aspects dont l'économie verte, qui est dédiée à la valorisation et au traitement des déchets. La réutilisation en local permettrait d'une part d'importer moins de matières premières et d'exporter moins de déchets.

Pour cela, 2 étapes ont été considérées dans cette thèse : la première étape a été de recourir le moins possible à l'importation des matériaux. Cependant, en local nous sommes confrontés à une pénurie des ressources disponibles sur notre territoire. Nous devons donc privilégier les matières premières secondaires en mettant en place des filières de valorisation et de traitement des déchets. Cela concourrait de façon notable à diminuer les flux d'import de matériaux et produits. Puis, nous avons considéré en second lieu, celle de la taille de notre marché, celle des petites

2ème configuration :



**4B1C ou BBBBC**

FIGURE 6.3 – Seconde illustration de profil possible

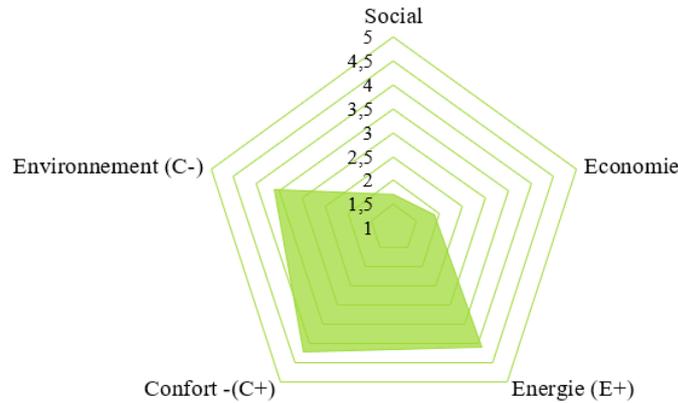
économies insulaires, qui est indéniablement contraignante, surtout lorsqu'il s'agit de prendre en compte le coût des matériaux de construction et produits, ou du fait de plusieurs contraintes, nous ne sommes pas épargnés par des surcoûts.

Nous soulignons l'importance de favoriser l'économie verte dans le bâtiment. Cette économie circulaire permettrait de limiter la consommation des matières premières et d'énergie. Cela passerait notamment par le développement du recyclage des déchets de chantier, et aussi par la préférence aux circuits courts et à l'utilisation de matériaux recyclés. Cette démarche pourrait rendre le secteur du bâtiment plus durable dans le temps et structurer véritablement une économie autour de la valorisation des déchets du bâtiment. La question de la taille réduite des économies insulaires peut quant à elle avoir de premiers éléments de solutions si l'on ne se limite pas au seul territoire de la Réunion. En effet, réfléchir à une valorisation des déchets à l'échelle de l'Indianocéanie pourrait être une opportunité de disposer d'un flux de matières suffisant pour la mise en place de filières pérennes économiquement.

Ainsi, définir la durabilité environnementale d'un bâtiment passe alors par plusieurs piliers. La « non » prise en compte de l'un de ces piliers ne permet pas de définir de façon pertinente le nouveau paradigme de durabilité d'un bâti surtout au sens large du terme.

Au final, l'ensemble de cette discussion a mis en exergue un élément fondamental concernant le repositionnement de la notion de durabilité du bâtiment. On comprend ainsi à l'aune des différentes définitions et enjeux, que le bâtiment doit s'appréhender comme un système vivant. Sa durabilité devra s'analyser lors de sa mise en oeuvre mais également lors de son fonctionnement avant d'arriver à sa fin de vie. Toute-

*3ème configuration :*



**2A1B2D ou AABDD**

FIGURE 6.4 – Troisième illustration de profil possible

fois nous avons bien vu, que cela est une première condition qui ne se suffit pas à elle même. En effet, comme tout "système vivant", un bâtiment est en interaction permanente avec son environnement. Ainsi, il est donc indispensable de pouvoir effectuer un bilan des flux matières et énergie afin de quantifier l'impact du bâtiment sur son environnement. Au final, ce nouveau paradigme de la durabilité doit intégrer diverses composantes du bâti : d'une part un aspect structurel à diverses étapes de la phase de cycle du bâtiment, d'autre part, un aspect fonctionnel, via une analyse des flux. La qualification de "durable" pourra ainsi se faire d'autant plus que le bâtiment sera performant lors de sa mise en oeuvre ou son démantèlement, et son impact sera positif sur l'économie local, en maîtrisant les flux de déchets et énergie en phase fonctionnelle.



# Conclusion et Perspectives

---

**N**os travaux de thèse avaient pour objectif d'évaluer la qualité environnementale des bâtiments. Ce travail a très vite mis en exergue plusieurs verrous importants qu'ils étaient indispensables de pouvoir lever, afin de définir les périmètres d'intervention avec précision.

## - Conclusion générale de ces travaux : -

Le premier chapitre des résultats a démontré un écart de plus de 200 kg CO<sub>2</sub> eq lors de l'évaluation de l'impact environnemental de la construction d'un bâti à la Réunion et en France métropolitaine pour le GWP. Nous avons également souligné que les impacts du NMVOC, TOPP, AP, ADP-E étaient plus conséquent pour le cas de la Réunion. Ces résultats ont permis de montrer dans un premier temps qu'il est important d'effectuer une évaluation environnementale au lieu d'un simple bilan carbone, puis, dans un second temps, ils ont permis la mise en évidence du surcoût environnemental existant entre ces deux territoires. Ces résultats nous ont alertés sur la nécessité de la régionalisation des données d'inventaires pour le cas des territoires insulaires. Cet écart important entre les deux cas souligne l'importance de l'adaptation des futures exigences réglementaires concernant l'aspect environnemental des bâtiments.

Par la suite nous nous sommes intéressés au fonctionnement du bâti. Nous avons proposé une décarbonisation de la production du mix électrique local à travers des scénarii. Nous avons évalué le mix électrique local actuel (2022) : il s'élève à 0,686 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh, et comprend 31,3% d'énergies renouvelables. Puis nous avons évalué le mix électrique pour 2030 et 2040 en intégrant progressivement les énergies renouvelables et l'élimination du charbon. Pour 2030, le mix électrique s'élèvera à 0,195 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh, et sera composé de 100% d'énergies renouvelables (géothermie 5,66%, UVE 3,26%, gaséification 4,68%, bagasse 9,7%, biogaz 0,6%, hydro 11,6%, énergie de la mer 16,6%, valorisation des déchets 8,7%, éolienne 1%, PV 7,1% et écorces de bois 31,1%). Enfin en 2040, le mix électrique s'élèvera à 0,239 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh et sera composé également de 100% d'énergies renouvelables. Pour 2040, l'écorce de bois représentera plus de 26% à lui seul, et la géothermie passera de 5,66

à 9,66%. Par conséquent, cette forte diminution de l'impact de la production du mix électrique entraînera également une diminution de l'impact environnemental total des bâtis : soit de 2% sur l'aspect structurel, de 45% sur l'aspect fonctionnement et de 1% sur son impact en fin de vie. La prospective nous aura donc permis de projeter des trajectoires possible de décarbonisation principalement pour la phase fonctionnelle des bâtis. Ainsi cette décarbonisation est un effet direct sur le flux énergie de la maison, et nous as permis d'aboutir à une diminution significative sur la phase fonctionnelle du bâtiment.

Le chapitre V portait sur la simplification des évaluations environnementales des bâtis. Notre démarche a été de proposer des alternatives à travers des modèles simplifiés plus accessible pour l'évaluation des bâtis via le couplage ACV-PARETO. Nous avons identifié un jeu de 5 matériaux de construction et produits étant les plus influents au sein de ces modèles. Nous avons ainsi, après comparaison des données, proposer un modèle simplifié de l'impact d'un bâti avec une précision comprise entre 4 à 7%, en fonction des indicateurs. Notre seconde démarche de simplification dans ce chapitre a été la mise en place d'un indicateur composite, qui a permis de synthétiser à travers une seule grandeur, l'ensemble de l'information contenu par les indicateurs initiaux. L'ACP a servi d'outil d'analyse de sensibilité afin de sélectionner les paramètres les plus influents. L'ICE donne donc lieu au prémice de la définition des seuils de la qualité environnementale des bâtis, qui peut être un socle de réflexion concernant la réglementation environnementale dans les DROM. L'affichage de ces étiquettes permettrait de rapidement catégoriser les bâtis et voir immédiatement le niveau de performance environnemental d'un sujet. Ainsi, ces travaux posent les jalons d'une réflexion politique incitative sur la qualité environnementale d'un bâti durable, et propose surtout des outils d'aide à la conception accessible aux professionnels du secteur.

Le chapitre VI, synthétise l'ensemble de ces travaux. La problématique des bâtiments dits durables a été pendant trop longtemps définie à travers diverses notions telles que : " les bâtiments à performance énergétique", " les bâtiments à haute performance environnementale" etc. Ainsi le choix a été fait pendant longtemps de ne se focaliser que sur le principe d'intégration d'énergies renouvelables au bâtiment ou de choix de conception bioclimatique. En aucun cas, la question des choix des matériaux, et de leur usage en fin de vie ne s'était posé. Aujourd'hui on souligne que le bâti est un élément vivant en interaction avec son environnement. Et que ce dernier doit être et évalué dans toutes ses phases de vie. Ces travaux répondent à une partie des enjeux de la qualité environnementale des bâtiments. Nous avons redéfini alors le concept "bâtiment durable" en repensant le bâti dans l'ensemble de son cycle de vie (structurel, fonctionnel, fin de vie), et en partant du principe de sa capacité à s'autorecycler.

**- Les limites de ces travaux : -**

Dans cette thèse, l'une des premières limites que nous avons rencontrées a été de faire le choix de considérer uniquement l'aspect énergie lors de l'évaluation des impacts environnementaux en phase fonctionnelle. Ce choix de prendre en compte uniquement cet aspect nous a permis cependant d'approfondir les résultats et de proposer ainsi des scénarii de décarbonisation dans le secteur du bâtiment à la Réunion à moyen et long terme.

Une autre limite de ces travaux porte sur le périmètre et les seuils de performance de qualité environnementale des bâtiments. En effet ce nouveau paradigme pose les cinq bases à considérer. Toutefois les seuils de performances sont amenés à évoluer dans le temps compte tenu des exigences réglementaires. Même si le concept se doit d'être "vivant" et dynamique pour s'adapter aux évolutions, il est crucial de garder un socle de base d'indicateurs minimaux qui ne changent pas afin de permettre des analyses comparatives à travers le temps.

La base des cinq piliers que nous avons présentée pour définir le nouveau paradigme de durabilité d'un bâtiment a cependant une limite : la temporalité. En effet, la base scientifique que nous proposons dans ces travaux est une base évolutive ou d'autres thématiques peuvent être ajoutées. En effet, notre base permettrait la comparaison et la définition des seuils de performance pour les bâtiments dans un premier temps. Puis, l'ajout d'autres thématiques viendraient compléter cette base initiale. Nous soulignons ici que l'importance de ce concept garde la même méthode d'évaluation, malgré les exigences réglementaires évolutives.

Aujourd'hui nous considérons que cinq critères sont à considérer pour évaluer pertinemment la durabilité d'un bâti, dans dix ans, d'autres critères et circonstances viendront bouleverser, modifier cette redéfinition complexe.

**- Les perspectives : -**

Une première perspective serait d'adjoindre une analyse économique à ces travaux. En effet, dans un objectif réglementaire, un des leviers forts serait la mise en place de dispositifs incitatifs. A titre d'exemple, on peut de façon triviale imaginer un dispositif de défiscalisation d'une construction proportionnelle à la part de matières premières secondaires, ou au taux de recyclage du bâtiment en fin de vie.

Sur l'aspect fonctionnel, il est nécessaire d'étendre nos travaux sur la quantification dans un premier temps de l'ensemble des flux matières (eau, alimentation,

déchets...), afin de faire une évaluation environnementale la plus complète possible.

Pour une meilleure gestion des matériaux de construction et produits, un troisième point envisagé serait de créer un bassin de valorisation et de traitement des déchets dans le sud-ouest de l'Océan Indien incluant l'île Maurice, Madagascar, Mayotte, Les Comores et Les Seychelles. Ce cercle indianocéanique permettrait de répondre de manière efficace à la gestion des déchets qui devient problématique à l'égard de ces zones non interconnectées.

Enfin, une perspective forte de notre travail sera de changer d'échelle de modélisation et d'analyse en allant vers des systèmes plus complexes tels que le quartier-iris ou la ville. En effet la durabilité d'un bâtiment doit se voir à l'aulne d'un système en interaction avec son environnement, et soucieux du devenir de cet environnement. L'échelle des espaces bâtis se prête donc parfaitement à ce niveau d'analyse. Les études de cas telle que la Réunion, représentant des petits espaces insulaires disposant de peu de ressources, sont particulièrement intéressantes. En effet, l'ACV apparaît comme l'outil idéal de compréhension de cette empreinte urbaine, ou du métabolisme d'un espace bâti. Les limites et qualités de l'analyse ne seront encadrées que par la qualité de l'information dont nous disposerons. Cela va nous permettre d'expérimenter des scénarios de diminution des impacts pour les îles et tenter de mettre en oeuvre une méthodologie répliquable à d'autres espaces insulaires et de capitaliser sur les pratiques et solutions pour contenir les impacts environnementaux.

# Bibliographie

- [Abd Rashid 2015] Ahmad Faiz Abd Rashid et Sumiani Yusoff. *A review of life cycle assessment method for building industry*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 45, pages 244–248, 2015. (Cité en pages 26, 39 et 59.)
- [Abd Rashid 2017] Ahmad Faiz Abd Rashid, Juferi Idris et Sumiani Yusoff. *Environmental impact analysis on residential building in malaysia using life cycle assessment*. Sustainability, vol. 9, no. 3, page 329, 2017. (Cité en pages 27, 58, 74 et 82.)
- [Advisor 2021] BATI Advisor. *PÉNURIE DE MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION*, 2021. (Cité en page 19.)
- [Agorah 2022] Agorah. *Rapport Annuel Observatoire des déchets*, jan 2022. (Cité en page 64.)
- [Aktas 2012] Can B Aktas et Melissa M Bilec. *Impact of lifetime on US residential building LCA results*. The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 17, no. 3, pages 337–349, 2012. (Cité en page 25.)
- [Anand 2017] Chirjiv Kaur Anand et Ben Amor. *Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings : A critical review*. Renewable and sustainable energy reviews, vol. 67, pages 408–416, 2017. (Cité en pages 24 et 39.)
- [Arzoumanidis 2017] Ioannis Arzoumanidis, Roberta Salomone, Luigia Petti, Giovanni Mondello et Andrea Raggi. *Is there a simplified LCA tool suitable for the agri-food industry? An assessment of selected tools*. Journal of Cleaner Production, vol. 149, pages 406–425, 2017. (Cité en page 114.)
- [Asdrubali 2013] Francesco Asdrubali, Catia Baldassarri et Vasilis Fthenakis. *Life cycle analysis in the construction sector : Guiding the optimization of conventional Italian buildings*. Energy and Buildings, vol. 64, pages 73–89, 2013. (Cité en pages 24, 25 et 37.)
- [Audouin 2016] Sarah Audouin, Laurent Gazull, Anthony Benoist et Francois Broust. *Analysis of gasification ways for Piton Saint-Leu CFPPA and at the regional scale, Reunion Island*. Rapport technique, INIS, 2016. (Cité en page 90.)
- [Ayagapin 2020] Leslie Ayagapin et Jean Philippe Praene. *Environmental Overcost of Single Family Houses in Insular Context : A Comparative LCA Study of Reunion Island and France*. Sustainability, vol. 12, no. 21, page 8937, 2020. (Cité en pages 27, 58 et 78.)
- [Ayagapin 2021] Leslie Ayagapin, Jean Philippe Praene, Doorgeshwaree Jaggeshar et Dinesh Surroop. *Prospective Life Cycle Assessment : Effect of Electricity*

- Decarbonization in Building Sector*. Energies, vol. 14, no. 11, page 3184, 2021. (Cité en page 101.)
- [Bagheri 2007] Ali Bagheri et Peder Hjorth. *Planning for sustainable development : a paradigm shift towards a process-based approach*. Sustainable development, vol. 15, no. 2, pages 83–96, 2007. (Cité en page 131.)
- [Bass 1993] Stephen MJ Bass. *Ecology and economics in small islands : constructing a framework for sustainable development*. In Economics and Ecology, pages 156–176. Springer, 1993. (Cité en page 57.)
- [BATIMAT 2021] BATIMAT. *Qu'est ce qu'un bâtiment durable?*, 2021. (Cité en page 132.)
- [Beck 2018] Silke Beck et Martin Mahony. *The IPCC and the new map of science and politics*. Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change, vol. 9, no. 6, page e547, 2018. (Cité en page 39.)
- [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, 2016. (Cité en pages 10 et 53.)
- [Berardi 2011] Umberto Berardi. *Beyond sustainability assessment systems : Upgrading topics by enlarging the scale of assessment*. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development, vol. 2, no. 4, pages 276–282, 2011. (Cité en pages 135 et 138.)
- [Berardi 2012] Umberto Berardi. *Sustainability assessment in the construction sector : rating systems and rated buildings*. Sustainable development, vol. 20, no. 6, pages 411–424, 2012. (Cité en page 131.)
- [Berardi 2013a] Umberto Berardi. *Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building*. Sustainable cities and society, vol. 8, pages 72–78, 2013. (Cité en pages 131 et 132.)
- [Berardi 2013b] Umberto Berardi. *Sustainability assessment of urban communities through rating systems*. Environment, development and sustainability, vol. 15, no. 6, pages 1573–1591, 2013. (Cité en page 135.)
- [Berthou 2015] Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Philippe Rivière, Pascal Stabat, Damien Casetta et Dominique Marchio. *Smart-E : a tool for energy demand simulation and optimization at the city scale*. Building Simulation 2015, 2015. (Cité en page 41.)
- [Blengini 2010] Gian Andrea Blengini et Tiziana Di Carlo. *The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings*. Energy and buildings, vol. 42, no. 6, pages 869–880, 2010. (Cité en page 62.)

- [Brand 2007] Ralf Brand et Andrew Karvonen. *The ecosystem of expertise : complementary knowledges for sustainable development*. Sustainability : Science, practice and policy, vol. 3, no. 1, pages 21–31, 2007. (Cité en page 131.)
- [Brander 2008] M Brander, R Tipper, C Hutchison et G Davis. *Technical Paper : Consequential and attributional approaches to LCA : a Guide to policy makers with specific reference to greenhouse gas LCA of biofuels*, 2008. (Cité en page 31.)
- [Brightman 2008] HS Brightman, DK Milton, D Wypij, HA Burge et JD Spengler. *Evaluating building-related symptoms using the US EPA BASE study results*. Indoor air, vol. 18, no. 4, pages 335–345, 2008. (Cité en page 132.)
- [Briguglio 1995] Lino Briguglio. *Small island developing states and their economic vulnerabilities*. World development, vol. 23, no. 9, pages 1615–1632, 1995. (Cité en page 57.)
- [Brizmohun 2015] Ravina Brizmohun, Toolseeram Ramjeawon et Adisa Azapagic. *Life cycle assessment of electricity generation in Mauritius*. Journal of Cleaner Production, vol. 106, pages 565–575, 2015. (Cité en page 94.)
- [Brown 1997] Sandra Brown, U Asan et I Raev. *Les forêts et le changement climatique : les terres boisées comme puits de carbone*. Comptes rendus du XI Congrès forestier mondial, pages 13–22, 1997. (Cité en pages 69 et 131.)
- [BTP 2021] CER BTP. *Le logement social*. Rapport technique, CER BTP, 2021. (Cité en page 14.)
- [BuildGreen 2018] BuildGreen. *Le carbone biogénique et les matériaux biosourcés*, 2018. (Cité en page 66.)
- [Buyle 2012] Matthias Buyle, Johan Braet et Amaryllis Audenaert. *LCA in the construction industry : a review*. International Journal of Energy and Environment, vol. 6, no. 4, pages 397–405, 2012. (Cité en page 34.)
- [Buyle 2013] Matthias Buyle, Johan Braet et Amaryllis Audenaert. *Life cycle assessment in the construction sector : A review*. Renewable and sustainable energy reviews, vol. 26, pages 379–388, 2013. (Cité en pages 25 et 27.)
- [Cabeza 2014] LFR Cabeza. *Lidia; Vilariño, Virginia; Pérez, Gabriel; Castell, Albert.(2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector : A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 29, no. 0, pages 394–416, 2014. (Cité en page 34.)
- [Carus 2018] Michael Carus et Lara Dammer. *The circular bioeconomy—concepts, opportunities, and limitations*. Industrial biotechnology, vol. 14, no. 2, pages 83–91, 2018. (Cité en page 71.)
- [Cassidy 2003] Robert Cassidy. *White paper on sustainability*. Building Design and Construction, vol. 10, 2003. (Cité en page 132.)

- [CEN 2011] CEN. Sustainability of construction works, assessment of environmental performance of buildings : Calculation method. NSAI, 2011. (Cité en page 39.)
- [Chau 2015] Chi Kwan Chau, TM Leung et WY Ng. *A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings*. Applied energy, vol. 143, pages 395–413, 2015. (Cité en page 26.)
- [CITEPA 2021] CITEPA. *Comment la filière bois peut elle contribuer à la neutralité carbone 2050?*, 2021. (Cité en page 67.)
- [Cole 1996] Raymond J Cole et Paul C Kernan. *Life-cycle energy use in office buildings*. Building and environment, vol. 31, no. 4, pages 307–317, 1996. (Cité en page 26.)
- [Cole 2005] Raymond J Cole. *Building environmental assessment methods : redefining intentions and roles*. Building Research & Information, vol. 33, no. 5, pages 455–467, 2005. (Cité en page 131.)
- [Colin 2005] A Colin et N Derrière. *La forêt française : un puits de carbone*. L'IF, vol. 7, page 8, 2005. (Cité en page 69.)
- [Commission 2008] Joint Research Centre-European Commission *et al.* Handbook on constructing composite indicators : methodology and user guide. OECD publishing, 2008. (Cité en pages 114 et 115.)
- [Commission 2010] European Commission. Joint research centre-institute for environment and sustainability : International reference life cycle data system (ilcd) handbook-general guide for life cycle assessment—detailed guidance. first édition, 2010. (Cité en page 31.)
- [Contarini 2015] Antonio Contarini et Arjen Meijer. *LCA comparison of roofing materials for flat roofs*. Smart and Sustainable Built Environment, 2015. (Cité en page 38.)
- [Curran 2005] Mary Ann Curran, Margaret Mann et Gregory Norris. *The international workshop on electricity data for life cycle inventories*. Journal of cleaner production, vol. 13, no. 8, pages 853–862, 2005. (Cité en page 31.)
- [Datalab 2020] Datalab. *Chiffres clés du climat France Europe et monde*, 2020. (Cité en page 2.)
- [Dataworldbank 2022] Dataworldbank. *Développement urbain*, apr 2022. (Cité en page 40.)
- [De Lasso 2016] João De Lasso, Josué França, Kárida Espirito Santo et Assed Haddad. *Case study : LCA methodology applied to materials management in a Brazilian residential construction site*. Journal of Engineering, vol. 2016, 2016. (Cité en page 26.)

- [de Moura 2018] Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, Luiz Fernando Loureiro Legey et Mark Howells. *A Brazilian perspective of power systems integration using OSeMOSYS SAMBA—South America Model Base—and the bargaining power of neighbouring countries : A cooperative games approach*. Energy Policy, vol. 115, pages 470–485, 2018. (Cité en page 89.)
- [DEAL 2014] DEAL. *Schéma Régionale Climat, Air, Energie (SRCAE)*. Rapport technique, DEAL Réunion, 2014. (Cité en page 9.)
- [Delzendeh 2017] Elham Delzendeh, Song Wu, Angela Lee et Ying Zhou. *The impact of occupants' behaviours on building energy analysis : A research review*. Renewable and sustainable energy reviews, vol. 80, pages 1061–1071, 2017. (Cité en page 80.)
- [Ding 2014] Grace KC Ding. *Life cycle assessment (LCA) of sustainable building materials : an overview*. Eco-efficient construction and building materials, pages 38–62, 2014. (Cité en page 25.)
- [Doda 2016] Baran Doda, Caterina Gennaioli, Andy Gouldson, David Grover et Rory Sullivan. *Are corporate carbon management practices reducing corporate carbon emissions ?* Corporate Social Responsibility and Environmental Management, vol. 23, no. 5, pages 257–270, 2016. (Cité en page 40.)
- [Dong 2015a] Ya Hong Dong, Lara Jaillon, Peggy Chu et Chi Sun Poon. *Comparing carbon emissions of precast and cast-in-situ construction methods—A case study of high-rise private building*. Construction and building materials, vol. 99, pages 39–53, 2015. (Cité en pages 26, 40 et 74.)
- [Dong 2015b] Ya Hong Dong et S Thomas Ng. *A life cycle assessment model for evaluating the environmental impacts of building construction in Hong Kong*. Building and Environment, vol. 89, pages 183–191, 2015. (Cité en pages 26, 40 et 58.)
- [Du Plessis 2011] Chrisna Du Plessis et Raymond J Cole. *Motivating change : shifting the paradigm*. Building Research & Information, vol. 39, no. 5, pages 436–449, 2011. (Cité en page 133.)
- [Ecologie.gouv 2021] Ecologie.gouv. *La loi anti-gaspillage pour une économie circulaire*, 2021. (Cité en page 135.)
- [Ekvall 1999] Tomas Ekvall. *Key methodological issues for life cycle inventory analysis of paper recycling*. Journal of Cleaner Production, vol. 7, no. 4, pages 281–294, 1999. (Cité en page 34.)
- [Ekvall 2002] Tomas Ekvall. *Cleaner production tools : LCA and beyond*. Journal of Cleaner Production, vol. 5, no. 10, pages 403–406, 2002. (Cité en page 29.)
- [EU 2019] EU. *The green deal*. Rapport technique, European commission, 2019. (Cité en pages 51 et 97.)

- [EU 2020] EU. *Commission proposal for a regulation : European Climate Law*. Rapport technique, European Commission, 2020. (Cité en page 4.)
- [FFB 2021] FFB. *La construction durable*, 2021. (Cité en page 132.)
- [Finnveden 1997] Göran Finnveden et Per Östlund. *Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications*. Energy, vol. 22, no. 9, pages 923–931, 1997. (Cité en page 49.)
- [Finnveden 2009] Göran Finnveden, Michael Z. Hauschild, Tomas Ekvall, Jeroen Guinée, Reinout Heijungs, Stefanie Hellweg, Annette Koehler, David Pennington et Sangwon Suh. *Recent developments in Life Cycle Assessment*. Journal of Environmental Management, vol. 91, no. 1, pages 1–21, 2009. (Cité en page 31.)
- [Fouquet 2015a] Marine Fouquet. *Réflexions et contributions méthodologiques à l'ACV de bâtiments neufs : modélisation du contributeur énergie*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes (ComUE), 2015. (Cité en page 71.)
- [Fouquet 2015b] Marine Fouquet, Annie Levasseur, Manuele Margni, Alexandra Lebert, Sébastien Lasvaux, Bernard Souyri, Catherine Buhé et Monika Woloszyn. *Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings : Application to biogenic carbon and global warming assessment*. Building and Environment, vol. 90, pages 51–59, 2015. (Cité en page 25.)
- [Fowke 1996] Raymond Fowke et Deo K Prasad. *Sustainable development, cities and local government : Dilemmas and definitions*. Australian Planner, vol. 33, no. 2, pages 61–66, 1996. (Cité en page 131.)
- [Fritsche 1998] Uwe R Fritsche, Martin Cames, Gero Lücking et Eje Sandberg. *Öko-Institut*. V., FREIBURG, DARMSTADT, BERLIN, 1998. (Cité en page 33.)
- [Geographic 2021] National Geographic. *Le niveau de CO2 dans l'atmosphère bat un record vieux de 3 millions d'années*, apr 2021. (Cité en page 2.)
- [Geraldini 2020] Matheus Soares Geraldini et Enedir Ghisi. *Building-level and stock-level in contrast : A literature review of the energy performance of buildings during the operational stage*. Energy and Buildings, vol. 211, page 109810, 2020. (Cité en page 39.)
- [Gerbaulet 2019] C. Gerbaulet, C. von Hirschhausen, C. Kemfert, C. Lorenz et P.-Y. Oei. *European electricity sector decarbonization under different levels of foresight*. Renewable Energy, vol. 141, pages 973–987, Octobre 2019. (Cité en page 97.)
- [GERRI 2008] GERRI. *Grenelle de l'Environnement à la Réunion- Réussir l'Innovation*, 2008. (Cité en page 9.)
- [Glasgo 2017] Brock Glasgo, Chris Hendrickson et Inês Lima Azevedo. *Assessing the value of information in residential building simulation : Comparing simulated*

- and actual building loads at the circuit level.* Applied Energy, vol. 203, pages 348–363, 2017. (Cité en page 80.)
- [Gnansounou 2008] Edgard Gnansounou. *Assessing the energy vulnerability: Case of industrialised countries.* vol. 36, no. 10, pages 3734–3744, Octobre 2008. (Cité en page 116.)
- [GoC 2020] GoC. *Émissions de gaz à effet de serre : facteurs et incidences, 2020.* Government of Canada. (Cité en page 2.)
- [Groen 2014] Evelyne A Groen, Reinout Heijungs, Eddy AM Bokkers et Imke JM De Boer. *Methods for uncertainty propagation in life cycle assessment.* Environmental Modelling & Software, vol. 62, pages 316–325, 2014. (Cité en page 36.)
- [Gros 2016] Adrien Gros, Emmanuel Bozonnet, Christian Inard et Marjorie Musy. *Simulation tools to assess microclimate and building energy—A case study on the design of a new district.* Energy and Buildings, vol. 114, pages 112–122, 2016. (Cité en page 41.)
- [Guérin-Schneider 2017] Lætitia Guérin-Schneider et Marie Tsanga Tabi. *L'Analyse du Cycle de Vie, nouvel outil d'évaluation environnementale à l'appui des politiques publiques locales : Quelle appropriation par les services d'assainissement ?* Gestion et management public, vol. 5, no. 2, pages 61–83, 2017. (Cité en page 35.)
- [Guggemos 2006] Angela Acree Guggemos et Arpad Horvath. *Decision-support tool for assessing the environmental effects of constructing commercial buildings.* Journal of Architectural Engineering, vol. 12, no. 4, pages 187–195, 2006. (Cité en page 38.)
- [Guinée 2002] Jeroen B Guinée et Erwin Lindeijer. *Handbook on life cycle assessment : operational guide to the iso standards, volume 7.* Springer Science & Business Media, 2002. (Cité en page 49.)
- [Gupta 2008] Eshita Gupta. *Oil vulnerability index of oil-importing countries.* vol. 36, no. 3, pages 1195–1211, Mars 2008. (Cité en page 116.)
- [Gupta 2018] Rajat Gupta et Alkis Kotopouleas. *Magnitude and extent of building fabric thermal performance gap in UK low energy housing.* Applied Energy, vol. 222, pages 673–686, 2018. (Cité en page 80.)
- [Häfliger 2017] Ian-Frederic Häfliger, Viola John, Alexander Passer, Sebastien Lavaux, Endrit Hoxha, Marcella Ruschi Mendes Saade et Guillaume Habert. *Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials.* Journal of cleaner production, vol. 156, pages 805–816, 2017. (Cité en page 62.)
- [Hardy 2010] Michael Hardy. *Pareto's law.* The Mathematical Intelligencer, vol. 32, no. 3, pages 38–43, 2010. (Cité en page 104.)

- [Hashempour 2020] Najme Hashempour, Roohollah Taherkhani et Mahdi Mahdikhani. *Energy performance optimization of existing buildings : A literature review*. Sustainable Cities and Society, vol. 54, page 101967, 2020. (Cité en page 39.)
- [Head 2019] Marieke Head, Pierre Bernier, Annie Levasseur, Robert Beauregard et Manuele Margni. *Forestry carbon budget models to improve biogenic carbon accounting in life cycle assessment*. Journal of cleaner production, vol. 213, pages 289–299, 2019. (Cité en page 65.)
- [Hoarau 2017] Christelle 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*. Thèse de doctorat, Université de la Réunion, 2017. (Cité en page 16.)
- [Holger 2010] K Holger, N Kohler, J Kreissig et T Lützkendorf. *A life Cycle Approach to Buildings*. München, Institut für international Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2010. (Cité en page 24.)
- [Hopwood 2005] Bill Hopwood, Mary Mellor et Geoff O'Brien. *Sustainable development : mapping different approaches*. Sustainable development, vol. 13, no. 1, pages 38–52, 2005. (Cité en page 131.)
- [Hoxha 2017] Endrit Hoxha, Guillaume Habert, Sébastien Lasvaux, Jacques Chevalier et Robert Le Roy. *Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability*. Journal of cleaner production, vol. 144, pages 33–47, 2017. (Cité en pages 27, 36, 37, 58, 74, 81 et 82.)
- [Huang 2017] Bin Huang, Ke Xing et Stephen Pullen. *Energy and carbon performance evaluation for buildings and urban precincts : review and a new modeling concept*. Journal of Cleaner Production, vol. 163, pages 24–35, 2017. (Cité en page 25.)
- [Hueting 2004] Roefie Hueting et Lucas Reijnders. *Broad sustainability contra sustainability : the proper construction of sustainability indicators*. Ecological economics, vol. 50, no. 3-4, pages 249–260, 2004. (Cité en page 131.)
- [Husson 2016] Francois Husson, Julie Josse, Sebastien Le, Jeremy Mazet et Maintenier Francois Husson. *Package 'FactoMineR'*. An R package, vol. 96, page 698, 2016. (Cité en page 88.)
- [IEDOM 2019] IEDOM. *Rapport annuel*. Rapport technique, IEDOM, 2019. (Cité en pages 10 et 14.)
- [Infociments 2021] Infociments. *Construction durable*, 2021. (Cité en page 133.)
- [INSEE 2016] INSEE. *La départementalisation de la Réunion*, 2016. (Cité en page 13.)
- [INSEE 2018] INSEE. *Les besoins en logements à La Réunion à l'horizon 2035*. Rapport technique, INSEE, 2018. (Cité en page 14.)

- [ISO 1997] ISO. Iso 14040 : Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. 1997. (Cité en page 39.)
- [ISO 2005] ISO ISO. *TC 71, "Business Plan, Concrete, Reinforced Concrete and Pre-Stressed Concrete"*. 2005. (Cité en page 109.)
- [ISO 2006] ISO. Environmental management : life cycle assessment ; requirements and guidelines. ISO Geneva, 2006. (Cité en pages 29 et 51.)
- [Jauze 1998] Jean-Michel Jauze. *Les centralités emboîtées de l'espace réunionnais*. Mappemonde, vol. 51, no. 3, pages 27–30, 1998. (Cité en page 10.)
- [Jevons 1866] William Stanley Jevons. The coal question ; an inquiry concerning the progress of the nation and the probable exhaustion of our coal-mines. 1866. (Cité en page 130.)
- [Johnson 2009] Eric Johnson. *Goodbye to carbon neutral : Getting biomass footprints right*. Environmental impact assessment review, vol. 29, no. 3, pages 165–168, 2009. (Cité en page 71.)
- [Kahhat 2009] Ramzy Kahhat, John Crittenden, Fariya Sharif, Ernesto Fonseca, Ke Li, Anil Sawhney et Peng Zhang. *Environmental impacts over the life cycle of residential buildings using different exterior wall systems*. Journal of Infrastructure Systems, vol. 15, no. 3, pages 211–221, 2009. (Cité en pages 38 et 61.)
- [Kaiser 1961] Henry F. Kaiser. *A NOTE ON GUTTMAN'S LOWER BOUND FOR THE NUMBER OF COMMON FACTORS*<sup>1</sup>. vol. 14, no. 1, pages 1–2, Mai 1961. (Cité en page 116.)
- [Kamali 2016] Mohammad Kamali et Kasun Hewage. *Life cycle performance of modular buildings : A critical review*. Renewable and sustainable energy reviews, vol. 62, pages 1171–1183, 2016. (Cité en page 24.)
- [Kamali 2019] Mohammad Kamali, Kasun Hewage et Rehan Sadiq. *Conventional versus modular construction methods : A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings*. Energy and Buildings, vol. 204, page 109479, 2019. (Cité en pages 27, 58, 74 et 81.)
- [Karimpour 2014] Mahsa Karimpour, Martin Belusko, Ke Xing et Frank Bruno. *Minimising the life cycle energy of buildings : Review and analysis*. Building and Environment, vol. 73, pages 106–114, 2014. (Cité en page 34.)
- [Kassambara 2017] Alboukadel Kassambara. Practical guide to principal component methods in r : Pca, m (ca), famd, mfa, hcpc, factoextra, volume 2. Sthda, 2017. (Cité en page 116.)
- [Kellenberger 2012] Daniel Kellenberger, Martin Ménard, Stefan Schneider, Martin Hänger, M Org, K Victor et S Lenel. *Arealentwicklung für die 2000-Watt-Gesellschaft : Beurteilungsmethode in Anlehnung an den SIA-Effizienzpfad Energie*. Bern : Bundesamt für Energie, 2012. (Cité en page 34.)

- [Kennedy 2012] Michael J Kennedy, Emily Ely, Cathy Newman Thomas, Paige C Pullen, Jennifer R Newton, Kristen Ashworth, Mira T Cole et Shelly P Lovelace. *Using multimedia tools to support teacher candidates' learning*. *Teacher Education and Special Education*, vol. 35, no. 3, pages 243–257, 2012. (Cité en page 131.)
- [Kibert 2012] Charles J Kibert et Maryam Mirhadi Fard. *Differentiating among low-energy, low-carbon and net-zero-energy building strategies for policy formulation*. *Building Research & Information*, vol. 40, no. 5, pages 625–637, 2012. (Cité en page 130.)
- [Kibert 2016] Charles J Kibert. *Sustainable construction : green building design and delivery*. John Wiley & Sons, 2016. (Cité en page 131.)
- [Klöpper 2006] Walter Klöpffer. *The role of SETAC in the development of LCA*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 11, no. 1, pages 116–122, 2006. (Cité en page 24.)
- [Laurance 2008] William F Laurance et Timothy J Curran. *Impacts of wind disturbance on fragmented tropical forests : a review and synthesis*. *Austral Ecology*, vol. 33, no. 4, pages 399–408, 2008. (Cité en page 29.)
- [Lee 2020] Taedong Lee, Mark B Glick et Jae-Hyup Lee. *Island energy transition : Assessing Hawaii's multi-level, policy-driven approach*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 118, page 109500, 2020. (Cité en pages 12 et 86.)
- [Legifrance 2019] Legifrance. *LOI no 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat*, 2019. (Cité en page 8.)
- [Leung 2015] Wanda Leung, Bram Noble, Jill Gunn et Jochen AG Jaeger. *A review of uncertainty research in impact assessment*. *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 50, pages 116–123, 2015. (Cité en page 37.)
- [Li 2021] Lingyan Li, Wanming Sun, Wei Hu et Yongkai Sun. *Impact of natural and social environmental factors on building energy consumption : Based on bibliometrics*. *Journal of Building Engineering*, page 102136, 2021. (Cité en page 80.)
- [Liska 2014] Adam J Liska, Haishun Yang, Maribeth Milner, Steve Goddard, Humberto Blanco-Canqui, Matthew P Pelton, Xiao X Fang, Haitao Zhu et Andrew E Suyker. *Biofuels from crop residue can reduce soil carbon and increase CO<sub>2</sub> emissions*. *Nature Climate Change*, vol. 4, no. 5, pages 398–401, 2014. (Cité en page 71.)
- [Llantoy 2020] Noelia Llantoy, Marta Chàfer et Luisa F Cabeza. *A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate*. *Energy and Buildings*, page 110323, 2020. (Cité en page 38.)

- [Longui 2014] EL Longui, D Romeiro, P Pflieger, IL Lima, FG Silva Jr, JN Garcia, G Bortolotto Jr, AOL Freire Neto et SMB Florsheim. *Radial variation of anatomical features, physicommechanical properties and chemical constituents and their potential influence on the wood quality of 45-year-old Eucalyptus propinqua*. Australian Forestry, vol. 77, no. 2, pages 78–85, 2014. (Cité en page 65.)
- [Lotteau 2015] Marc Lotteau, Grace Yopez-Salmon et Nicolas Salmon. *Environmental Assessment of Sustainable Neighborhood Projects through NEST, a Decision Support Tool for Early Stage Urban Planning*. Procedia Engineering, vol. 115, pages 69–76, 2015. Toward integrated modelling of urban systems. (Cité en page 25.)
- [Lu 2013] Yuehong Lu, Zhijia Huang et Ting Zhang. *Method and case study of quantitative uncertainty analysis in building energy consumption inventories*. Energy and Buildings, vol. 57, pages 193–198, 2013. (Cité en page 36.)
- [MacQueen 1967] James MacQueen et al. *Some methods for classification and analysis of multivariate observations*. In Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability, volume 1, pages 281–297. Oakland, CA, USA, 1967. (Cité en page 88.)
- [Mainali 2014] Brijesh Mainali, Shonali Pachauri, Narasimha D Rao et Semida Silveira. *Assessing rural energy sustainability in developing countries*. Energy for Sustainable Development, vol. 19, pages 15–28, 2014. (Cité en page 114.)
- [Martínez-Rocamora 2016] A Martínez-Rocamora, Jaimer Solís-Guzmán et Madelyn Marrero. *LCA databases focused on construction materials : A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58, pages 565–573, 2016. (Cité en page 25.)
- [McDonough 2002] William McDonough et Michael Braungart. *Remaking the way we make things : Cradle to cradle*. New York : North Point Press. ISBN, vol. 1224942886, page 104, 2002. (Cité en pages 131 et 138.)
- [McGillivray 1993] Mark McGillivray et Howard White. *Measuring development ? The UNDP's human development index*. Journal of international development, vol. 5, no. 2, pages 183–192, 1993. (Cité en page 115.)
- [Meadows 2013] Donella H Meadows, Jorgen Randers et Dennis L Meadows. *The limits to growth (1972)*. Yale University Press, 2013. (Cité en page 130.)
- [Mitterpach 2016] Jozef Mitterpach et Jozef Štefko. *An environmental impact of a wooden and brick house by the LCA Method*. In Key Engineering Materials, volume 688, pages 204–209. Trans Tech Publ, 2016. (Cité en page 26.)
- [Morales 2019] Michele Morales, Gustavo Moraga, Ana Paula Kirchheim et Ana Pasuello. *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 pages 27, 58, 61, 74 et 84.)

- [Myers 2007] Georgia Myers, Richard Reed et Jon Robinson. *The relationship between sustainability and the value of office buildings*. In PRRES 2007 : Proceedings of the 13th Annual Conference of the Pacific Rim Real Estate Society, pages 1–22. Pacific Rim Real Estate Society, 2007. (Cité en page 132.)
- [Ndiaye 2011] Demba Ndiaye et Kamiel Gabriel. *Principal component analysis of the electricity consumption in residential dwellings*. Energy and buildings, vol. 43, no. 2-3, pages 446–453, 2011. (Cité en page 88.)
- [Nwodo 2019] Martin N Nwodo et Chimay J Anumba. *A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach*. Building and Environment, vol. 162, page 106290, 2019. (Cité en page 40.)
- [Oduyemi 2017] Olufolahan Oduyemi, Michael Iheoma Okoroh et Oluwaseun Samuel Fajana. *The application and barriers of BIM in sustainable building design*. Journal of Facilities Management, 2017. (Cité en page 9.)
- [Oliver-Solà 2011] Jordi Oliver-Solà, Alejandro Josa, Alejandro P Arena, Xavier Garrell et Joan Rieradevall. *The GWP-Chart : An environmental tool for guiding urban planning processes. Application to concrete sidewalks*. Cities, vol. 28, no. 3, pages 245–250, 2011. (Cité en page 41.)
- [Olmer 2017] Naya Olmer, Bryan Comer, Biswajoy Roy, Xiaoli Mao et Dan Rutherford. *Greenhouse Gas Emissions from Global Shipping, 2013–2015 Detailed Methodology*. International Council on Clean Transportation : Washington, DC, USA, pages 1–38, 2017. (Cité en page 63.)
- [Oovango 2021] Oovango. *Fret maritime : l’Outre-mer sous la menace inflationniste*, jul 2021. Impactés par la crise sanitaire, les transporteurs maritimes accumulent un immense retard logistique, ce qui provoque une saturation mondiale des capacités de fret. Conséquences : tous les produits importés vont coûter plus cher pour le consommateur d’Outre-mer. (Cité en page 140.)
- [Parliament 2020] European Parliament. *DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. Rapport technique, European Commission, 2020. (Cité en page 5.)
- [Paul James 2015] Liam Magee Paul James Andy Scerri. *Urban Sustainability in Theory and Practice : Circles of Sustainability*, 2015. (Cité en page 142.)
- [PCR 1975] PCR. *Plan Immédiat de Survie*. Rapport technique, Partie Communiste Réunionnais, 1975. (Cité en pages 13 et 86.)
- [Perez 2015] Nicolas Perez, Peter Riederer, Christian Inard et Vincent Partenay. *Thermal building modeling adapted to district energy simulation*. In Building Simulation, 2015. (Cité en page 41.)
- [Perez 2018] Sergio Garcia Perez. *Environmental assessment at the urban level combining LCA-GIS methodologies : A case study of energy retrofits in the Barcelona*

- metropolitan area*. Building and Environment, vol. 134, page 191204, 2018. (Cité en page 41.)
- [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 13.)
- [Praene 2018] Jean Philippe Praene, Mahéva Payet et Fiona Bénard-Sora. *Sustainable transition in small island developing states : Assessing the current situation*. Utilities Policy, vol. 54, pages 86–91, Octobre 2018. (Cité en page 114.)
- [Praene 2019] Jean Philippe Praene, Mahéva Payet et Fiona Bénard-Sora. *Corrigendum to ‘Sustainable transition in small island developing states : Assessing the current situation’ [Utilities Policy (2018) 86–91]*. vol. 56, pages 194–200, Février 2019. (Cité en page 116.)
- [Praene 2020] Jean Philippe Praene. *Energie et territoires : Une approche multiscalaire de la transition écologique*. Hdr, Université de la Réunion, 2020. (Cité en page 17.)
- [Puettmann 2010] Maureen E Puettmann, Richard Bergman, Steve Hubbard, Leonard Johnson, Bruce Lippke, Elaine Oneil et Francis G Wagner. *Cradle-to-gate life-cycle inventory of US wood products production : CORRIM Phase I and Phase II products*. 2010. (Cité en page 38.)
- [Rakotoson 2018a] Vanessa Rakotoson. *Intégration de l’analyse de cycle de vie dans l’étude de la production électrique en milieux insulaires*. PhD thesis, La Réunion, 2018. (Cité en pages 8 et 63.)
- [Rakotoson 2018b] Vanessa Rakotoson. *Intégration de l’analyse de cycle de vie dans l’étude de la production électrique en milieux insulaires*. Thèse de doctorat, Université de la Réunion, 2018. (Cité en pages 17 et 63.)
- [Ramesh 2010] Thillaigovindan Ramesh, Ravi Prakash et KK Shukla. *Life cycle energy analysis of buildings : An overview*. Energy and buildings, vol. 42, no. 10, pages 1592–1600, 2010. (Cité en page 25.)
- [Risch 2012] Eva Risch, Philippe Roux, Catherine Boutin et Alain Héduit. *L’analyse de cycles de vie des systèmes d’assainissement : un outil complémentaire d’aide à la décision*. Sciences Eaux & Territoires, no. 9, pages p–82, 2012. (Cité en page 35.)
- [Roberts 2020] Matthew Roberts, Stephen Allen et David Coley. *Life cycle assessment in the building design process—A systematic literature review*. Building and Environment, page 107274, 2020. (Cité en page 39.)
- [Rode 2011] Philipp Rode et Ricky Burdett. *Cities : investing in energy and resource efficiency*. LSE Research Online, 2011. (Cité en page 40.)

- [Roh 2016] Seungjun Roh, Sungho Tae, Sung Joon Suk, George Ford et Sungwoo Shin. *Development of a building life cycle carbon emissions assessment program (BEGAS 2.0) for Korea's green building index certification system*. Renewable and sustainable energy reviews, vol. 53, pages 954–965, 2016. (Cité en page 26.)
- [Romano 2016] Antonio A. Romano, Giuseppe Scandurra, Alfonso Carfora et Rosaria V. Pansini. *Assessing the determinants of SIDS' pattern toward sustainability : A statistical analysis*. vol. 98, pages 688–699, Novembre 2016. (Cité en page 116.)
- [Rosenberg 2017] Michael Rosenberg, Duane Jonlin et Steven Nadel. *A Perspective of Energy Codes and Regulations for the Buildings of the Future*. Journal of Solar Energy Engineering, vol. 139, no. 1, page 010801, 2017. (Cité en page 80.)
- [Røyne 2016] Frida Røyne, Diego Peñaloza, Gustav Sandin, Johanna Berlin et Magdalena Svanström. *Climate impact assessment in life cycle assessments of forest products : implications of method choice for results and decision-making*. Journal of cleaner production, vol. 116, pages 90–99, 2016. (Cité en page 65.)
- [RTAADROM 2016] RTAADROM. *Réglementation Thermique, Acoustique et Aérotation pour les Départements d'Outre-Mer*, 2016. (Cité en page 86.)
- [Russell 2005] Andrea Russell, Tomas Ekvall et Henrikke Baumann. *Life cycle assessment introduction and overview*. Journal of Cleaner Production, vol. 13, no. 13-14, pages 1207–1210, 2005. (Cité en page 34.)
- [Sadik-Zada 2021] Elkhan Richard Sadik-Zada et Andrea Gatto. *Energy security pathways in South East Europe : Diversification of the natural gas supplies, energy transition, and energy futures*. In From Economic to Energy Transition, pages 491–514. Springer, 2021. (Cité en page 97.)
- [Saltelli 2007] Andrea Saltelli. *Composite indicators between analysis and advocacy*. Social indicators research, vol. 81, no. 1, pages 65–77, 2007. (Cité en page 114.)
- [Sartori 2007] Igor Sartori et Anne Grete Hestnes. *Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings : A review article*. Energy and buildings, vol. 39, no. 3, pages 249–257, 2007. (Cité en pages 26 et 39.)
- [Sartori 2021] Thais Sartori, Robin Drogemuller, Sara Omrani et Fiona Lamari. *A schematic framework for Life Cycle Assessment (LCA) and Green Building Rating System (GBRS)*. Journal of Building Engineering, vol. 38, page 102180, 2021. (Cité en page 39.)
- [Schlegl 2019] Friederike Schlegl, Johannes Gantner, René Traunspurger, Stefan Albrecht et Philip Leistner. *LCA of buildings in Germany : Proposal for a future benchmark based on existing databases*. Energy and Buildings, vol. 194, pages 342–350, 2019. (Cité en pages 26, 40 et 74.)

- [Schwarz 2020] Marius Schwarz, Christina Nakhle et Christof Knoeri. *Innovative designs of building energy codes for building decarbonization and their implementation challenges*. Journal of Cleaner Production, vol. 248, page 119260, 2020. (Cité en pages 80 et 131.)
- [Selosse 2018] Sandrine Selosse, Olivia Ricci, Sabine Garabedian et Nadia Maïzi. *Exploring sustainable energy future in Reunion Island*. Utilities Policy, vol. 55, pages 158–166, 2018. (Cité en page 90.)
- [Sharma 1996] Sughash Sharma. *Applied multivariate techniques*. 1996. (Cité en page 88.)
- [Sharma 2011] Aashish Sharma, Abhishek Saxena, Muneesh Sethi, Venu Shreeet *al.* *Life cycle assessment of buildings : a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 1, pages 871–875, 2011. (Cité en pages 26 et 39.)
- [Sheehan 2014] John J Sheehan, Paul R Adler, Stephen J Del Grosso, Mark Easter, William Parton, Keith Paustian et Stephen Williams. *CO 2 emissions from crop residue-derived biofuels*. Nature Climate Change, vol. 4, no. 11, pages 932–933, 2014. (Cité en page 71.)
- [Shen 2012] Endong Whang Zhigang Shen. *A hybrid Data Quality Indicator and statistical method for improving uncertainty analysis in LCA of complex system – application to the whole-building embodied energy analysis*. Journal of Cleaner Production, vol. 43, pages 166–173, 2012. (Cité en page 36.)
- [Simon 2008] Thierry Simon. *Une île en mutation. Infrastructures, aménagement et développement à La Réunion*. EchoGéo, no. 7, 2008. (Cité en page 55.)
- [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 114.)
- [Singh 2011] Amanjeet Singh, George Berghorn, Satish Joshi et Matt Syal. *Review of life-cycle assessment applications in building construction*. Journal of architectural engineering, vol. 17, no. 1, pages 15–23, 2011. (Cité en page 27.)
- [Sirkin 1994] Ted Sirkin et Maarten ten Houten. *The cascade chain : a theory and tool for achieving resource sustainability with applications for product design*. Resources, conservation and recycling, vol. 10, no. 3, pages 213–276, 1994. (Cité en page 71.)
- [Soust-Verdaguer 2016a] Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas et Antonio García-Martínez. *Simplification in life cycle assessment of single-family houses : A review of recent developments*. Building and Environment, vol. 103, pages 215–227, 2016. (Cité en pages 25, 26 et 40.)
- [Soust-Verdaguer 2016b] C. Llatas Soust-Verdaguer. *Simplification in life cycle assessment of single family houses : a review of recent developments*. Buildings, vol. 103, pages 215–227, 2016. (Cité en page 114.)

- [Spindler 2013] Edmund A Spindler. *The history of sustainability the origins and effects of a popular concept*. In Sustainability in tourism, pages 9–31. Springer, 2013. (Cité en page 130.)
- [Taliotis 2016] Constantinos Taliotis, Abhishek Shivakumar, Eunice Ramos, Mark Howells, Dimitris Mentis, Vignesh Sridharan, Oliver Broad et Linus Mofor. *An indicative analysis of investment opportunities in the African electricity supply sector—Using TEMBA (The Electricity Model Base for Africa)*. Energy for Sustainable Development, vol. 31, pages 50–66, 2016. (Cité en page 90.)
- [TER 2019] TER. *Comptes économiques rapides de La Réunion en 2019*. Rapport technique, CEROM Comptes Économiques Rapides pour l’Outre-mer, 2019. (Cité en page 11.)
- [Thormark 2007] Catarina Thormark. *Energy and resources, material choice and recycling potential in low energy buildings*. In CIB Conference, SB, volume 7, 2007. (Cité en page 26.)
- [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 88.)
- [Tillman 2004] AM Tillman et H Baumann. *The Hitchhikers guide to LCA*. Lund, Sweden : Studentlitteratur AB, page 157, 2004. (Cité en page 28.)
- [Tilman 2009] David Tilman, Robert Socolow, Jonathan A Foley, Jason Hill, Eric Larson, Lee Lynd, Stephen Pacala, John Reilly, Tim Searchinger, Chris Somerville et al. *Beneficial biofuels—the food, energy, and environment trilemma*. Science, vol. 325, no. 5938, pages 270–271, 2009. (Cité en page 65.)
- [Ürge-Vorsatz 2012] Diana Ürge-Vorsatz, Nick Eyre, Peter Graham, Danny Harvey, Edgar Hertwich, Yi Jiang, Christian Kornevall, Mili Majumdar, James E McMahon, Sevastianos Mirasgediset al. *Energy end-use : Buildings*. In Global energy assessment : Toward a sustainable future, pages 649–760. Cambridge University Press, 2012. (Cité en page 80.)
- [Vallance 2011] Suzanne Vallance, Harvey C Perkins et Jennifer E Dixon. *What is social sustainability? A clarification of concepts*. Geoforum, vol. 42, no. 3, pages 342–348, 2011. (Cité en page 131.)
- [Van Dronkelaar 2016] Chris Van Dronkelaar, Mark Dowson, E Burman, Catalina Spataru et Dejan Mumovic. *A review of the energy performance gap and its underlying causes in non-domestic buildings*. Frontiers in Mechanical Engineering, vol. 1, page 17, 2016. (Cité en page 80.)
- [Vilches 2017] Alberto Vilches, Antonio Garcia-Martinez et Benito Sanchez-Montanes. *Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment : A litera-*

- ture review*. Energy and Buildings, vol. 135, pages 286–301, 2017. (Cité en page 39.)
- [Vogtländer 2014] Joost G Vogtländer, Natascha M van der Velden et Pablo van der Lugt. *Carbon sequestration in LCA, a proposal for a new approach based on the global carbon cycle; cases on wood and on bamboo*. The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 19, no. 1, pages 13–23, 2014. (Cité en page 65.)
- [Vollmer 2016] Derek Vollmer, Helen M Regan et Sandy J Andelman. *Assessing the sustainability of freshwater systems : A critical review of composite indicators*. Ambio, vol. 45, no. 7, pages 765–780, 2016. (Cité en page 114.)
- [WCED 1987] SPECIAL WORKING SESSION WCED. *World commission on environment and development*. Our common future, vol. 17, no. 1, pages 1–91, 1987. (Cité en page 130.)
- [Weil 2006] Marcel Weil, Udo Jeske et Liselotte Schebek. *Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values*. Waste Management & Research, vol. 24, no. 3, pages 197–206, 2006. (Cité en page 109.)
- [Wiloso 2012] Edi Iswanto Wiloso, Reinout Heijungs et Geert R De Snoo. *LCA of second generation bioethanol : a review and some issues to be resolved for good LCA practice*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 7, pages 5295–5308, 2012. (Cité en page 71.)
- [WRI 2019] WRI. *Annual report*. Rapport technique, World Resources Institute, 2019. (Cité en pages xiii, 2 et 3.)
- [Zeng 2017] Ruochen Zeng et Abdol Chini. *A review of research on embodied energy of buildings using bibliometric analysis*. Energy and Buildings, vol. 155, pages 172–184, 2017. (Cité en page 39.)
- [Zhang 2013] Xiaoling Zhang, Liyin Shen et Lei Zhang. *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 53.)
- [Zhang 2014] Weiqian Zhang, Shen Tan, Yizhong Lei et Shoubing Wang. *Life cycle assessment of a single-family residential building in Canada : A case study*. In Building Simulation, volume 7, pages 429–438. Springer, 2014. (Cité en page 24.)



## **Life Cycle Assessment for Climate emergency : A Multiscale Analysis of the Environmental Quality of Buildings in a subtropical island environment.**

---

**Abstract :** Environmental impacts from anthropogenic activities remain significantly present in the atmosphere. A large part of these environmental impacts is attributable to the construction sector. This thesis was developed in the context of the ecological transition at the scale of Reunion Island. The objective of this work is to understand the factors of the environmental quality of buildings in an insular subtropical environment and to propose alternative approaches to these assessments. The environmental performance of buildings can allow a significant reduction of greenhouse gas (GHG) emissions at both structural and functional scales. In this thesis, a first evaluation of the environmental impacts of the built single-family houses (SFH) allowed us to identify and define the total ratios while considering the representative share of the structural, functional, and end-of-life scales. For this, it was necessary to build a regional database that regionalizes the emission factors (EF) specific to the island. This holistic approach allowed us to highlight the environmental over cost of the island due to its geographical location. Furthermore, we considered another constraint : the impact of the local electricity production mix, which contributes strongly to the operational phase. For this purpose, a prospective approach was carried out through decarbonization scenarios and allowed to determine the decrease of the impact of local electricity generation for the next to 2040, thanks to the integration of new technologies. Finally, the local database having been primarily developed, two approaches, "simplified" and "synthesized," were proposed : the simplified approach was initiated to make LCA affordable to professionals so that they have simplified tools for evaluating their projects. Then, the synthesized approach (ICE) allowed us to simplify the information and propose an impact threshold applicable to the constructions in an insular environment. Finally, given all these works, we bring to the first light the importance of integrating a new paradigm of building sustainability. This definition must incorporate the capacity of the building recycling capacity. But it must be considered a short economic chain of revalorization at the scale of India-Oceania.

**Keywords :** Life cycle assessment, climate emergency, ecological transition, environmental impacts, environmental quality, building, environmental performance, decarbonization, prospective, sustainability, green economy.

---

## **L'Analyse de Cycle de Vie au défi de l'urgence climatique : une analyse multi-échelle de la qualité environnementale des bâtiments en milieu subtropical insulaire.**

---

**Résumé :** Les impacts environnementaux émis par les activités anthropiques demeurent présents de façon significative dans l'atmosphère. Une large part de ces impacts environnementaux est attribuable au secteur de la construction. Cette thèse s'est construite dans la logique de la transition écologique à l'échelle du territoire de La Réunion. L'objectif de ces travaux est de comprendre les facteurs de la qualité environnementale des bâtiments en milieu subtropical insulaire et de proposer des approches alternatives à ces évaluations. La performance environnementale des bâtis peut permettre une importante réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) aussi bien à échelle structurelle que fonctionnelle. Dans cette thèse, une première évaluation des impacts environnementaux des maisons individuelles (MI) construites a permis d'identifier et de définir les ratios totaux tout en tenant compte de la part représentative des échelles structurelle, fonctionnelle et fin de vie. Pour cela, il a été nécessaire de construire une base de données locale, qui régionalise les facteurs d'émissions (FE) spécifique à l'île. Cette approche holistique a permis de mettre en évidence le surcoût environnemental que subit l'île à cause de sa situation géographique. Une autre contrainte a également été prise en compte : celle de l'impact de la production du mix électrique local qui contribue fortement en phase fonctionnelle. Pour cela, une approche prospective a été effectuée à travers la réalisation de scénarii de décarbonisation, et a permis de déterminer la diminution de l'impact de la production électrique locale à horizon 2040, grâce à l'intégration de nouvelles technologies. Enfin, la base de données locale ayant été largement développée, deux approches « simplifiée » et « synthétisée » ont été proposées : l'approche simplifiée a été initiée pour rendre l'ACV accessible aux acteurs locaux et professionnels, afin que ces derniers disposent d'outils simplifiés pour l'évaluation de leur projet. Puis, l'approche synthétisée (ICE) a permis de simplifier l'information et de proposer un seuil d'impact applicable aux constructions en milieu insulaire. Enfin, au vu de l'ensemble de ces travaux, nous apportons un premier éclairage sur l'importance de l'intégration d'un nouveau paradigme de durabilité d'un bâtiment à travers sa redéfinition, en tenant compte d'une économie verte autour de la valorisation des déchets du bâtiment à échelle de l'Indianocéanie.

**Mots clés :** Analyse de cycle de vie, urgence climatique, transition écologique, impacts environnementaux, qualité environnementale, bâtiment, performance environnementale, décarbonisation, prospective, durabilité, économie verte.

---