



HAL
open science

Description et analyse du fonctionnement énergétique des espaces bâtis. Mises en œuvre systémique du bilan carbone associé. Application à l'Eco Ferme de Vincenzo et au territoire de Mayotte

El Assad Nidhoimi

► To cite this version:

El Assad Nidhoimi. Description et analyse du fonctionnement énergétique des espaces bâtis. Mises en œuvre systémique du bilan carbone associé. Application à l'Eco Ferme de Vincenzo et au territoire de Mayotte. Physique [physics]. Université de la Réunion, 2018. Français. NNT : 2018LARE0047 . tel-02316042

HAL Id: tel-02316042

<https://theses.hal.science/tel-02316042>

Submitted on 15 Oct 2019

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.

École doctorale Sciences Technologies et Santé

THESE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITE DE LA REUNION

Pour obtenir le

GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : «Physique Énergétique Appliquée Au Bâtiment»

Présentée publiquement par

EI Assad NIDHOIMI

**DESCRIPTION ET ANALYSE DU FONCTIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE DES ESPACES
BÂTIS. MISE EN ŒUVRE SYSTÉMIQUE DU BILAN CARBONE ASSOCIÉ.**

APPLICATION À L'ECO FERME DE VINCENDO ET AU TERRITOIRE DE MAYOTTE

Directeur de thèse : Pr. Jean-Claude GATINA

Soutenue le 19 juillet 2018, devant la commission d'examen composée de :

M. Belkacem ZEGHMATI,	Professeur	Rapporteur
M. Hery Tiana RAKOTONDRAMIANANA,	Professeur	Rapporteur
Mme. Bienvenue Ranaivo RABEHAJA,	Professeur	Examineur
Mme. Fiona BENARD-SORA,	Maître de Conférences	Examineur
M. Dimitri BIGOT	Maître de Conférences	Examineur
M. Damien FAKRA	Docteur-Ingénieur	Examineur
M. Jean-Claude GATINA	Professeur	Directeur de thèse

**Laboratoire PIMENT
Équipe d'accueil EA 4518**

117 rue du Général Ailleret, 97430 Le Tampon, La Réunion, France

URL: <http://piment.univ-reunion.fr/>

Avant-Propos

"Happy is who gets to know the reasons for things" Citation of Virgil

"Ce que le Créateur décrète pour quelqu'un, aucun être n'est en mesure de le stopper" Citation mahoraise

Ce travail n'aurait pas pu prendre forme et éclore sans la grâce du Créateur du soleil, qui nous fournit de l'énergie quotidiennement, et l'aide de nombreuses personnes croisées sur le chemin de la thèse. Je tiens à remercier l'ensemble de ces personnes pour l'attention et l'aide qu'elles m'ont apportée, que ce soit de près ou de loin, durant les différentes étapes de la préparation, au déroulement, jusqu'à la soutenance de cette thèse. Elles ont su chacune à leur manière agrémenter mes journées et faire fructifier mon expérience personnelle.

Les travaux de recherche, menés dans le cadre de la thèse et présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein du laboratoire de Physique Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'environnement et le bâtiment (PIMENT) à l'Université de La Réunion. Ils ont fait l'objet d'une allocation de recherche doctorale octroyée par le Conseil Départemental de Mayotte (CDM) à travers les fonds FSE (Fond Social Européen) de l'Union Européenne. Je témoigne ma gratitude envers les Présidents du CDM, du laboratoire PIMENT et de l'Université de La Réunion. Je remercie l'ensemble du personnel du CDM et de l'Université de La Réunion qui ont pu me faciliter les démarches administratives liées à la thèse ou encore égayer mes journées juste avec quelques mots ou des sourires échangés.

Je veux, tout particulièrement, remercier et exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, le Professeur hors classe Jean-Claude GATINA, d'avoir accepté de m'encadrer sur ce travail de thèse et sans qui rien n'aurait pu ni débiter, ni s'achever. Son écoute, son calme, ses conseils m'ont beaucoup apporté et encouragé à travailler et à persévérer même dans les moments de doutes. Il a cru en mes capacités, c'est un être consciencieux qui cherche à sortir le meilleur de chaque personne, parfois en des termes très vifs, mais toujours dans l'esprit de te pousser vers l'excellence. Ces années de travail à vos côtés m'ont permis d'apprendre énormément sur le rôle d'un chercheur et de pouvoir mieux m'organiser afin d'optimiser le temps comme il se doit. C'est avec un immense respect, joie et plaisir que je souhaite encore vous remercier pour toutes les choses que vous avez faites pour moi ainsi que votre amabilité. Je pense que la majorité (pour ne pas dire la totalité) des personnes qui ont travaillé avec vous peuvent témoigner que vous êtes une de ces personnes rares que l'on peut trouver encore aujourd'hui. Ces personnes qui aiment faire en sorte que les choses avancent convenablement en apportant leur aide de manière totalement humble. C'est en ce sens que je souhaite également vous adresser mes vives et

chaleureuses félicitations pour votre distinction reçue le jeudi 12 octobre 2017 de la part du Président de l'Université d'Antananarivo au titre de Docteur Honoris Causa.

J'adresse également un grand merci à Damien FAKRA, Docteur-Ingénieur au sein du laboratoire PIMENT pour l'aide précieuse qu'il a pu me donner pour ce travail et d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse. Sa longue expérience, comparer à moi, de la vie, de la recherche et du laboratoire PIMENT combiné à de longues discussions et des sacrifices qu'il a parfois conciliés à réaliser afin de pouvoir m'apporter son aide m'ont véritablement aiguillé durant cette aventure de thèse. Je n'oublie pas non plus Steven MENARD, qui a été très aimable durant la période où j'ai travaillé dans les locaux du service technique de PIMENT.

De même, je suis très reconnaissant envers Bruno Malet-Damour et Dimitri Bigot tous deux Maîtres de Conférences à l'Université de La Réunion, de m'avoir accordé de leur temps afin de mieux préparer le manuscrit de thèse. Merci, Bruno pour ton amitié et ces conversations qui ont su m'aiguiller au bon moment. Merci à Dimitri d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse. Je n'oublie évidemment pas de remercier l'ensemble des enseignants chercheurs du laboratoire PIMENT en général, et plus particulièrement ceux du département Science du Bâtiment et de l'Environnement (SBE). Je pense notamment à Fiona, Lise, Jean-Philippe, Harry ainsi que tous les autres. Je te remercie Fiona BENARD-SORA d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Mes remerciements vont aussi à Madame Bienvenu Ranaivo RABEHAJA pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

J'adresse également mes vifs remerciements à Messieurs les Professeurs Belkacem ZEGHMATI et Hery Tiana RAKOTONDRAMARANA pour avoir accepté de rapporter ce travail et de participer au jury de thèse.

Je remercie autant l'ensemble des doctorants et collègues que j'ai pu rencontrer et croiser durant cette thèse. Ils ont toutes et tous partagé leurs connaissances, leurs visions de la recherche et de la vie en général durant ces années passées ensemble. Je pense notamment à Vanessa, Édouard, Faly, Aymeric, Sidiki, Eve, Arthur, Alexandre ainsi que tous les autres.

Je remercie aussi chaleureusement mes amies et amis pour leur soutien et contribution de près ou de loin. Je pense en particulier, à Régis avec qui les conversations m'ont toujours permis d'avoir un esprit ouvert sur les choses, à Fred avec qui j'ai pu faire évader mon esprit durant nos trouvailles et nos échanges. Ce sont deux personnes d'une grande vivacité d'esprit et qui ont su être à mon écoute afin de m'apporter des conseils utiles et me permettre de prendre de la hauteur par rapport à certains événements.

Pour ma maman, dont un merci est trop peu tant elle a fortement œuvré afin que je me retrouve là aujourd'hui. Je me souviens des livres que tu achetas quand j'étais gamin et que j'enterrai dans le jardin, à la moindre occasion, pour éviter

d'apprendre et avoir plus de temps pour jouer. Malgré mes réticences, tu as su être patiente et me permettre de converger vers le savoir et la connaissance afin de nourrir mon esprit pour l'élever à devenir endurant et altruiste. Par ces quelques mots, je souhaite te féliciter et te rendre grâce, car tu as su m'apporter ce dont une maman doit donner à son fils et tu as su me laisser une certaine prise de décision pour que je puisse apprendre de moi même, à l'école de la vie tout en étant à mes côtés en cas de doute ou d'épreuve. Je te remercie pour cette confiance que tu m'as accordée et de ton soutien sans faille dans les moments de joie ou d'épreuve. Je n'oublie pas non plus le soutien financier de mon papa qui m'a très fortement encouragé à réaliser cette thèse. Cela a permis de m'octroyer l'énergie et la bénédiction nécessaires afin de réaliser ces travaux de recherches. Je n'oublie évidemment pas tous mes frères et sœurs, avec une pensée toute particulière pour Bayan, Laïla et Aby. Je vous souhaite à toutes et tous une excellente réussite.

Ma reconnaissance s'adresse également à celle qui a su rester patiente pendant toute cette aventure, malgré mon caractère qui peut paraître sibyllin, qui a su aussi m'encourager sur ce travail, et qui partage également ma vie, je parle de ma chérie FABI Haouthouna. Sans oublier, de mentionner notre rayon de soleil à tous les deux qui est Amra dont la naissance a eu lieu durant cette thèse et qui illumine depuis nos journées et soirées. On t'aime fort Amra.

Enfin, je dédie cette thèse mes parents, à ma fille Amra et sa maman Haouthouna, à ma grande Famille et à tous ceux qui me sont chers.

À ma Maman, mon papa
Ma fille AMRA ainsi que Haouthouna

Résumé

Dans un contexte où les tensions liées aux ressources énergétiques fossiles sont de plus en plus vives, concevoir une nouvelle manière d'appréhender le contexte énergétique est devenu essentiel.

Les moyens de production et de consommation énergétiques habituels ont montré leur limite avec l'apparition de nouveau type de pollution pour différents secteurs. Dans ce rapport de thèse, nous nous sommes essentiellement axés sur le secteur de l'électricité en proposant un Outil, d'aide à la décision, pour simuler la consommation électrique ainsi que la production électrique à partir des énergies renouvelables (EnR). La simulation de la consommation électrique permet d'avoir des informations à différents échelles d'observation en s'appuyant sur une démarche systémique et typologique, qui permet de calculer le bilan carbone associé à cette consommation ainsi que son coût annuel. Par la suite, cette consommation a été analysée à l'échelle horaire afin de pouvoir la mettre en relation avec des fichiers de production pour effectuer un pilotage au niveau de la courbe de charge.

Ce pilotage a pour but de lisser les pics au niveau de la courbe de charge.

Les premiers résultats analytiques obtenus à l'aide des outils développés montrent qu'il est possible de réduire l'appel au réseau électrique normal à un certain niveau en fonction des dimensionnements des systèmes de production EnR et du stockage. Ainsi que de pouvoir limiter les coûts d'investissement au juste nécessaire, c'est-à-dire avoir un prix le moins cher possible, grâce à une optimisation du système EnR.

Mots clés : Consommation électrique, production électrique d'origine EnR, approche systémique, approche typologique, ACV, Espace Bâti, Système d'Espace Bâti, Territoire, Bilan carbone

Abstract

In that times of heightened international tension and global concern about the fast-growing depletion of natural resources and the air pollution generated by the combustion of fossil fuels, adopting an alternative approach to the current energy context has become crucial.

Conventional energy production methods and consumption patterns have resulted in the emergence of new forms of environmental pollution in various energy demand sectors.

One of the main objectives of this thesis is to develop tool focusing on the electricity sector, which allow to simulate the electric energy consumption and production from renewable energy sources as well. That is, a tool for help at decision-making.

The simulation of the electric energy consumption based upon a systemic and typological approach gives in-depth information at different scales of observation, allowing to calculate the carbon footprint as well as the annual cost associated with this consumption.

In addition, relationships between the hourly electricity consumption and the hourly energy production were analyzed in order to be able to control the shape of the load curve. This control aims to smooth out the peaks in electric demand.

Preliminary analytical results obtained from the different tools showed that the electric demand from the power grid can be reduced to some extent, depending on both the renewable power generation systems and the energy-storage technology sizing. As well as to allow of limited the investment costs to the just necessary thanks to an optimization of the renewable energy system.

Key words: Electricity consumption, renewable energy production, systemic approach, typological approach, LCA, Built Space, Built Space System, Territory, carbon footprint

Liste des abréviations et nomenclature

EnR	É nergie n ouvelle R enouvelable
PV	P hotovoltaïque
CES	C hauffe E au S olaire
S.E.B	S ystème d' E space B âti
E.B	E space B âti
Bât	B âtiment
E.F	E space F onctionnel
P.C	P oste de C onsommation
C	C omposant
B.C	B ilan C arbone
S.A	S ecteur d' A ctivité
SC	S ystème de C onsommation
SP	S ystème de P roduction
STO	S ystème de S tockage
EXC	E xcédent
RES	A ppel R éseau
ONU	O rganisation des N ations U nies
AIE	A gence I nternational de l' É nergie
ADEME	A gence de l' E nvironnement et de la M aitrise de l' É nergie
CSR	C ombustible S olide de R écupération
CDM	C onseil D épartemental de M ayotte
tep	t onne équivalent p étrole
Mtep	M éga tonne équivalent p étrole
Wh	W att- h eur (correspond à l'énergie consommée par un système d'une puissance de 1 Watt pendant 1 heure)
BEF	B ilan É nergétique de la F rance
BEM	B ilan É nergétique de M ayotte
BER	B ilan É nergétique de la R éunion
EDF	É lectricité D e F rance
EDM	É lectricité D e M ayotte
GES	G az à E ffets de S erre
ACV	A nalyse du C ycle de V ie
OME	O bservatoire M ahorais de l' É nergie
IEDOM	I nstitut d' É mission des D épartements d' O utre- M er
INSEE	I nstitut N ational de la S tatistique et des É tudes É conomiques
SBE	S cience du B âtiment et de l' E nvironnement
PPE	P lan P luriannuel de l' É nergie
ETM	É nergie T hermique des M ers

Table des matières

AVANT-PROPOS	3
RESUME	9
ABSTRACT	11
NOMENCLATURE	13
TABLE DES MATIÈRES	15
INTRODUCTION GÉNÉRALE	19
1 - CHAPITRE I : ÉNERGIE ET ENVIRONNEMENT	23
1.1 - ENJEUX ET PROBLÉMATIQUE	24
1.1.1 - Enjeux liés à l'énergie	24
1.1.2 - Problématique énergétique au niveau mondial	30
1.1.3 - Problématique énergétique en France métropolitaine.....	34
1.1.4 - Problématique énergétique à La Réunion	40
1.1.5 - Problématique énergétique à Mayotte	44
1.2 - FORMES FONDAMENTALES ET CONVERSION DE L'ÉNERGIE.....	49
1.2.1 - Les différentes formes fondamentales de l'énergie	49
1.3 - CADRE METHODOLOGIQUE.....	57
1.3.1 - Bases conceptuelles des outils de description et d'analyse	57
1.4 - Synthèse du CHAPITRE I.....	63
2 - CHAPITRE II : CONCEPTION ET RÉALISATION DES OUTILS DE SIMULATION DE LA CONSOMMATION, PRODUCTION ET PILOTAGE ÉNERGÉTIQUES.....	65
2.1 - CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA MISE EN ŒUVRE DES OUTILS.....	66
2.1.1 - Démarches conceptuelles autour de la consommation énergétique.....	66
2.1.2 - Bases conceptuelles d'évaluation de la production énergétique d'origine EnR	74
2.1.3 - Bases conceptuelles d'outil de pilotage de la distribution de l'énergie	76
2.2 - DEVELOPPEMENT DE L'OUTIL D'ÉVALUATION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE.....	78
2.2.1 - Objectifs autour du développement de l'outil d'évaluation.....	78
2.3 - OUTIL D'ÉVALUATION DE LA PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE	94
2.3.1 - Présentation générale	94
2.3.2 - Production photovoltaïque (PV)	96
2.3.3 - Production éolienne	102
2.4 - OUTIL DE PILOTAGE de la DISTRIBUTION D'EnR	107
2.4.1 - Principe	107

2.4.2 -	Mise en œuvre.....	115
2.5 -	Synthèse du CHAPITRE II	118
3 -	CHAPITRE 3 - APPLICATION DES OUTILS SUR UN SYSTÈME D'ESPACE BÂTI : ECO FERME DE VINCENDO	119
3.1 -	PRÉSENTATION DE L'ECO FERME ET DE SON ENVIRONNEMENT.....	120
3.1.1 -	Généralités	120
3.1.2 -	Situation énergétique de l'île de La Réunion	120
3.1.3 -	Localisation et présentation de l'Eco Ferme de Vincenzo	126
3.1.4 -	Identification des besoins électriques de l'Eco Ferme	128
3.1.5 -	Identification des potentiels du site de l'Eco Ferme.....	129
3.2 -	SIMULATION DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE, EVALUATION ET ANALYSE.....	129
3.2.1 -	Démarche	129
3.2.2 -	Simulation de la consommation électrique par tranche horaire.....	130
3.2.3 -	Évaluation et Analyse des consommations électriques du S.E.B et du bilan carbone 143	
3.3 -	SIMULATION DE LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE	159
3.3.1 -	Démarches	159
3.3.2 -	Simulation de la production électrique par tranche horaire	159
3.4 -	SYSTÈME DE PILOTAGE DE LA DISTRIBUTION D'EnR SUR L'ECO FERME DE VINCENDO.....	170
3.4.1 -	Principe de fonctionnement	170
3.4.2 -	Simulation de la distribution horaire d'électricité	172
3.5 -	Synthèse du Chapitre III	185
4 -	Chapitre 4 - Optimisation de la production d'électricité EnR dans le mix électrique d'un territoire : Application sur le département de Mayotte.....	187
4.1 -	DONNÉES GÉNÉRALES SUR LA SITUATION ÉNERGÉTIQUE ET ÉCONOMIQUE DU DÉPARTEMENT DE MAYOTTE.....	188
4.1.1 -	Situation énergétique de Mayotte	188
4.1.2 -	Les bases de données existantes	197
4.1.3 -	Analyse des données	206
4.2 -	SIMULATIONS DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE ET PRODUCTION ÉLECTRIQUE à PARTIR D'EnR (100 m ² de capteur photovoltaïque) SUR MAYOTTE. MISE EN OEUVRE DES FICHIERS HORAIRES ASSOCIÉS.....	221
4.2.1 -	Évaluation de la consommation électrique	221
4.2.2 -	Évaluation de la production électrique à partir d'EnR	245
4.3 -	SYSTÈME DE PILOTAGE DE LA DISTRIBUTION D'EnR SUR LE TERRITOIRE MAHORAIS	259
4.3.1 -	Outil de pilotage de la distribution d'énergie électrique	259

4.3. 2 - Rappel sur l'outil de pilotage et les problématiques pour un système d'espace bâti (SEB)	259
4.3. 3 - Adaptation de l'outil de pilotage de la distribution de l'énergie à l'échelle d'un territoire	263
4. 4 - Synthèse du chapitre IV	274
CONCLUSION GÉNÉRALE	276
TABLE DES FIGURES	279
LISTE DES TABLEAUX	286
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	290

INTRODUCTION GÉNÉRALE

«Le tout vaut plus que la somme des parties» Aristote

Nous nous intéressons dans cette thèse aux problématiques de gestion de l'énergie électrique à l'échelle des espaces bâtis et aussi des territoires.

À l'heure de la transition énergétique, dans tous les secteurs d'activité, nous devons repenser notre rapport à l'énergie. Jusqu'à il y a peu, autour des questions énergétiques, nous devons répondre aux besoins de consommation en mettant en œuvre des moyens de production qui se sont de plus en plus diversifiés pour intégrer les énergies renouvelables. Cette logique s'appliquait à toutes les formes fondamentales d'énergie et notamment à l'énergie électrique.

Les analyses énergétiques qui étaient conduites s'intéressaient de manière dissociée aux problématiques de maîtrise de la consommation autour de postes sensibles : le confort et l'éclairage, et de mise en œuvre de mix électrique le plus pertinent sur un territoire afin de tendre vers l'autonomie énergétique et de réduire les impacts environnementaux des dispositifs de production avec notamment des facteurs d'émission favorables à la réduction du bilan carbone. Cette approche a conduit à certains résultats encourageants en permettant des économies d'énergie tangibles et une optimisation des ressources énergétiques. Elle a cependant atteint ses limites. D'autres investigations doivent être menées pour assurer une gestion encore plus intelligente de la distribution de l'énergie[1] [2].

Une tarification modulable[3] a été mise en place pour sensibiliser et inciter à une consommation différée pour certains usages. L'objectif étant alors de limiter les pics de charges qui entraîne la mise en service de dispositifs de production couteux et à forts impacts environnementaux. Pour le rendre plus efficace, il est important de disposer d'une base de connaissance la plus fine possible autour de tous les postes de consommation et des commandes de distribution plus avancées dans le cadre des Smart-Grid.

Plusieurs autres pistes seront explorées dans cette thèse contribuant à répondre aux mêmes problématiques.

Une première piste consiste à explorer à l'aide de l'approche systémique les interactions entre plusieurs entités en lien avec l'énergie électrique dont les flux sont interconnectés à partir de réseaux de transports de plus en plus complexes. Ces interactions concernent des systèmes de consommation, des systèmes de production, des systèmes de stockage et des systèmes de pilotage de la distribution intégrés à un territoire donné. Il s'agit de cerner la description de tels systèmes à travers ses paramètres structurels et fonctionnels et de mettre en évidence toutes les corrélations en lien avec les flux énergétiques en jeu. Ces observations doivent se faire en mettant tout en relation avec tout, autour des postes de consommations et des espaces fonctionnels à différentes échelles, des bâtiments et Espaces Bâtis aux territoires. Elle doit pouvoir également se réaliser à différentes échelles de temps, sur l'année, le mois, la semaine, la journée et surtout sur l'heure. C'est le pas de temps où se réalise le pilotage des flux énergétiques. L'objectif est d'apporter une contribution dans l'élaboration d'une base de connaissance plus approfondie et leur analyse. Il s'agira de cerner des modèles et une

méthodologie permettant de simuler les flux d'énergie dans un espace bâti ou un système d'espace bâti dans une approche dynamique. Ces simulations conduisent à mettre en œuvre des bilans de consommation à différentes échelles d'observation. Ces bilans nous permettent en outre de réaliser une analyse environnementale autour notamment du bilan carbone et une analyse économique.

Une seconde piste consiste à établir un fichier horaire prévisionnel de consommation d'énergie électrique à l'échelle des espaces bâtis pour des secteurs d'activités types ou à l'échelle d'un micro-territoire comprenant plusieurs secteurs d'activités. Le micro-territoire désigne ici un micro-espace, contenu au sein d'une ville, dont la taille varie entre 1 à 25 Ha. Il s'agit de produire un fichier horaire de consommation sur une année que nous mettrons en interaction avec un fichier de production d'énergie électrique d'origine renouvelable, notamment solaire ou éolienne, c'est-à-dire une base de données météorologique. Ces fichiers pourraient s'appuyer sur des données réelles de consommations relevées à partir d'expérimentation in situ, elles pourraient également provenir de données statiques et encore de simulations basées sur des scénarios types de fonctionnement des espaces bâtis. C'est cette dernière option qui a été explorée. C'est la seule démarche qui peut être réalisée dans le cadre de projet en phase de conception. En effet, durant la phase de conception d'un projet, nous ne pouvons que émettre des projections futures en se basant sur des modèles de fonctionnement car le projet est encore inexistant, du coup les données sont aussi inexistantes afin d'effectuer une quelconque démarche ou analyse.

Une dernière piste de travail nous amène à nous intéresser à la gestion de la distribution de l'énergie intégrant des énergies nouvelles renouvelables (EnR). L'objectif est alors de réduire les pics de consommations sur un espace bâti ou un mini-territoire en gérant de façon optimale le soutirage d'énergie sur le réseau électrique, grâce à des dispositifs de production basés sur les EnR et des moyens de stockage. Par définition, tous lieux de vie humaine et toutes constructions, aménagements modifiant l'environnement naturel pour lui conférer des caractères artificiels, associés à l'activité humaine sont dénommés comme espace bâti. Le mini-territoire désigne un morceau d'un territoire dont la taille est supérieur à 25 Ha.

Ce travail s'appuie sur les outils qui ont été développés au sein du Laboratoire PIMENT autour de l'analyse des flux dans les systèmes bâtis. Ces outils s'inscrivent dans un cadre normatif associé à l'analyse de cycle de vie. Ils ont fait l'objet de développements spécifiques pour répondre aux objectifs que nous nous sommes fixés dans cette thèse.

Dans le chapitre 1 nous présenterons les enjeux et problématiques autour de la situation énergétique de deux territoires en milieu insulaire qui vont nous intéresser dans le cadre de cette thèse : La Réunion et Mayotte. Il s'agira de cerner toutes les données qui permettront de caractériser les contextes énergétiques associés à ces 2 départements français à des niveaux de développement éloignés, mais présentant sur bien de points des similarités au niveau des défis à relever, notamment en termes d'autonomie énergétique, de préservation des ressources et de maîtrise de l'environnement. Nous les restituerons dans le contexte national français et mondial afin de mieux analyser les enjeux que nous exposons. Nous nous attacherons aussi dans ce chapitre à définir notre perception de l'énergie dans une approche technologique afin d'aborder de la façon la plus claire possible les problématiques rencontrées autour des sources et ressources énergétiques, des dispositifs de production, de transports, de stockage et des systèmes de consommation. Il nous a enfin apparu nécessaire

de présenter les différents cadres méthodologiques qui guideront nos réflexions et études tout au long de cette thèse autour notamment de l'approche systémique et typologique et du cadre normatif en lien avec l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

Le chapitre 2 sera consacré à la conception et réalisation des outils que nous avons développés ou mis en œuvre au cours de la thèse. Il s'agit principalement de 3 outils :

- Un outil de simulation et d'analyse de la consommation énergétique dans des espaces bâtis qui avait fait l'objet de premiers développements dans le cadre de la thèse de Neria Rakotonarivo[4]. Cet outil a été développé dans le cadre de cette thèse à partir de pages génériques permettant une application à des espaces bâtis quelconques et un approfondissement des approches typologiques autour d'analyse de la consommation énergétique. Elle a aussi été développée pour générer des fichiers horaires de consommation en lien avec le fonctionnement énergétique des espaces bâtis observés. Ces fichiers nous seront utiles dans la suite de nos travaux de recherche.
- Un outil de simulation de la production d'énergie électrique à partir d'EnR: nous nous proposons de nous limiter aux dispositifs photovoltaïques et aux éoliennes, d'autres types de dispositifs peuvent être intégrés autour notamment des bioénergies. Cet outil nous permet de générer des fichiers de production dans le même format que les fichiers de consommation. Le type de format de fichier que nous générons avec notre outil est indisponible à partir des outils de simulations existants. C'est une raison qui explique aussi pourquoi nous avons tenu à développer nos propres outils dans nos recherches.
- Un outil de pilotage de la distribution électrique intégrant des productions à partir de sources d'énergie renouvelable et un stockage adapté afin de gérer de manière optimale le soutirage d'énergie sur le réseau électrique.

Dans le chapitre 3, nous nous proposons d'appliquer nos outils de simulation et d'analyse sur un système d'espaces bâtis situé à la Réunion : l'Eco Ferme de Vincendo. Ce micro-territoire d'une vingtaine d'hectares, comprend une dizaine d'espaces bâtis des différents secteurs d'activité (résidentiel, agricole, tertiaire, artisanale, ...).

Nous nous proposons d'atteindre trois objectifs en lien avec nos outils de simulation:

- Réaliser une simulation et une analyse des flux énergétiques lié à l'électricité au sein du système d'espaces bâtis.
- Mettre en œuvre un fichier horaire de consommation énergétique par postes de consommation pour l'ensemble du système d'espaces bâtis.
- Tester notre outil de pilotage de la distribution d'énergie au sein de l'espace bâti.

Dans le chapitre 4 nous conduirons les mêmes opérations sur le territoire de Mayotte. Les démarches doivent cependant être adaptées.

Les fichiers horaires de consommations doivent être reconstitués à partir de données existantes à l'échelle des territoires.

Il nous faudra aussi définir une échelle d'observation pour appliquer notre approche d'intégration d'EnR dans la consommation électrique dans le but de lisser les courbes de charge. Les premiers développements seront conduits autour de ces objectifs.

1 - CHAPITRE I

ÉNERGIE ET ENVIRONNEMENT



**«L'inconnu est énigme; l'inconnaissable est mystère.
Où et quand arrive-t-on au mystère?» Edgar Morin**

1.1 - ENJEUX ET PROBLÉMATIQUE

1.1.1 - Enjeux liés à l'énergie

Au début du XX^e siècle, il y avait environ 1,6 milliard de personnes sur terre, et environ 6,5 milliards au début du XXI^e siècle. En un siècle la population mondiale a été multipliée par quatre. En même temps, du point de vue énergétique, le début du XX^e siècle marque l'essor de nouvelles sources d'énergie comme le gaz, le pétrole ou même l'électricité (notamment hydraulique et nucléaire) qui ont considérablement augmenté nos ressources énergétiques. D'autres besoins ont en outre émergé. Tous ces éléments sont à l'origine de l'augmentation de la consommation énergétique qui a été multipliée par vingt du début du XX^e siècle au début du XXI^e siècle. De nos jours, les besoins énergétiques mondiaux sont couverts en majorité par les énergies fossiles (80%) qui sont très polluantes pour nombre d'entre elles. Nous sommes donc en droit de nous poser une question, pouvons-nous toujours continuer à vivre en sollicitant autant les ressources énergétiques primaires comme pendant le siècle passé[5]? Si non, comment remédier aux conséquences et mieux vivre tout en étant respectueux de l'environnement qui nous entoure? Ces questions posent le principe du respect et de la continuité de la vie. En effet, il y a beaucoup d'hostilités associées à la consommation énergétique. C'est-à-dire qu'avec l'exploitation des énergies fossiles, nous détruisons le plus souvent, pour ne pas dire tout le temps, notre écosystème et la vie qui y est contenu, que ce soit végétal, animale ou humaine sans forcément mettre en place des mesures compensatoires afin d'atténuer les effets nuisibles.

1.1.1.1 - Développement durable

Depuis la révolution industrielle, la société mondiale a connu un développement sans précédent tant sur le plan économique, technique et social. Ce développement s'est étendu, jusqu'à récemment, sans que les acteurs ne prennent le soin de mesurer les conséquences engendrées par cette évolution de mode de vie tant sur le plan énergétique que naturel[6]. C'est dans les années 70, avec les travaux du Club de Rome, qu'un certain nombre d'experts et de scientifiques ont commencé à réfléchir et à mesurer les conséquences induites par la consommation d'énergie fossile primaire très polluante pour notre planète dans le rapport "Halte à la croissance". C'est ainsi qu'ils ont décidé d'alerter quant à l'impact de l'activité des hommes sur la planète. Le Club de Rome est un groupe de réflexion réunissant des scientifiques, des économistes, des fonctionnaires nationaux et internationaux, ainsi que des industriels de 52 pays, préoccupés des problèmes complexes auxquels doivent faire face toutes les sociétés, tant industrialisées qu'en développement. C'est au même moment, que s'est aussi tenu le premier "Sommet de la Terre" à Stockholm dont le but est de définir les moyens de stimuler le développement durable au niveau mondial. Au total, il y a eu 5 "Sommet de la Terre" organisés par l'ONU tout les 10 ans depuis 1972 jusqu'en 2012 (1972 → Stockholm ; 1982 → Nairobi ; 1992 → Rio de Janeiro ; 2002 → Afrique du Sud ; 2012 → Rio de Janeiro). Pour information, c'est la conférence de 1992 de Rio de Janeiro qui a été le plus marquant de tous. En effet, elle a été marquée par l'adoption d'un texte fondateur de 27 principes intitulé "Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement" qui explicite la notion de développement durable. Elle a aussi permis d'adopter un programme d'action pour le XXI^e siècle, appelé Agenda 21, qui définit des recommandations concernant la mise en œuvre concrète des principes de la déclaration de Rio.

Néanmoins, c'est en 1987, avec le rapport dit Brundtland intitulé "Notre avenir à tous" où naît concrètement le concept de développement durable[7]. Le développement durable doit répondre aux besoins présents, sans que cela empêche les générations futures de répondre aux leurs.

Le développement durable vise à concilier trois piliers fondamentaux pour assurer à la société un cadre de vie général acceptable pour chacun.

Le premier de ces trois piliers est l'équité sociale dont le but est la satisfaction des besoins primordiaux en termes de logement, alimentation, santé et éducation pour une société. Cela afin de réduire les inégalités entre les individus dans le respect de leur culture.

Le second pilier est l'efficacité économique dont le but est d'assurer une gestion saine et durable de la société, sans préjudice pour l'environnement et pour l'Homme.

Le troisième et dernier pilier concerne la qualité environnementale dont le but est de préserver les ressources naturelles à long terme, en maintenant les grands équilibres écologiques et en limitant les impacts environnementaux liés à ces ressources naturelles, en particulier fossiles.

Ces trois piliers de développement durable peuvent être schématisés par la Figure 1.1.

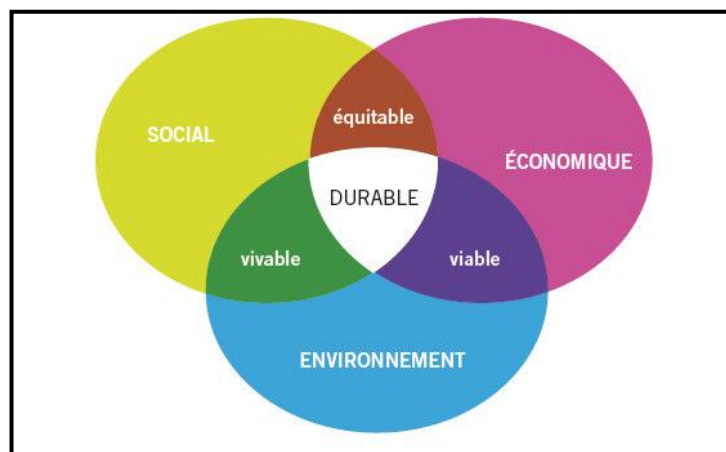


Figure 1.1 : Les trois piliers du Développement Durable
Source : ADEME

En plus de ces trois piliers fondamentaux, il existe aussi quatre principes fondamentaux liés au développement durable et qui sont :

- Solidarité entre les pays, entre les peuples, entre les générations, et entre les membres d'une société. Par exemple: mieux partager les matières premières.
- Précaution dans les décisions afin de ne pas provoquer des catastrophes lorsqu'il est établi qu'il existe des risques pour la santé ou l'environnement. Par exemple : limiter les émissions de CO₂ dans l'atmosphère.
- Participation de chacun, quelque soit sa profession ou son statut social, afin d'assurer la réussite de projets durables. Par exemple la responsabilité individuelle puis collective.
- Responsabilité de chacun, citoyen, industriel ou agriculteur afin que celui qui détériore, dégrade ou abîme répare lui-même ce qu'il aurait provoqué.

Nous notons que le développement durable est un concept qui définit un besoin de transition et de changement de paradigme dont a besoin notre planète et ses habitants pour vivre dans un monde plus équitable, en bonne santé et en respectant l'environnement et son prochain.

1.1.1.2 - Transition écologique

D'après le dictionnaire Larousse, le terme "écologie" vient étymologiquement du grec "oikos" qui signifie maison et "logos" qui signifie science ou connaissance et désigne la science qui étudie les relations des êtres vivants entre eux et avec leur environnement. Ici l'environnement désigne à la fois le milieu naturel ainsi que les éléments "non vivants" qui le compose par exemple le sol, l'eau, les matières fossiles, climat, atmosphère. Ce qui amène à définir la transition écologique comme le passage d'un mode d'interaction entre un être vivant, en l'occurrence l'Homme dans notre cas, et son environnement ou d'autres êtres vivants en ayant comme soucis de ne jouir que du juste nécessaire à son besoin et non pas d'aller vers le gaspillage[8]. D'ailleurs, l'auteur à l'origine du mot "transition écologique", Rob Hopkins (né en 1968) a inventé ce mot en se basant sur des principes et des pratiques issus des expériences d'autonomie locale dans un contexte de dépendance au pétrole. Il a exposé son concept dans un ouvrage publié en 2008 dont le titre est "The transition Handbook : From Oil Dependency to Local Resilience" et traduit en français en 2010 sous le titre "Manuel de transition : de la dépendance au pétrole à la résilience locale". Au vu du titre du livre, nous supposons que l'auteur s'appuie très fortement sur le prisme du pétrole pour appuyer sa thèse au niveau de la transition écologique. Or la transition écologique correspond avant tout à une transformation en profondeur de la population sur sa façon de produire, de consommer les biens de la nature, de travailler et de vivre ensemble. Elle correspond en grande partie à un changement de modèle économique et social, essentiellement basé sur le profit immédiat, à un autre paradigme basé sur l'écoute du plus démuné, l'entre-aide, le partage, la méditation, la spiritualité, etc..

En ce sens, la transition écologique peut se décliner en de multiples notions interdépendantes comme par exemple :

- la transition agroalimentaire : substitution d'une agriculture industrielle, chimique à une agriculture biologique paysanne;
- la transition industrielle : substitution d'une industrie délocalisée basée sur l'obsolescence programmée à une industrie de proximité avec des biens durables, facilement réparables et mieux recyclables;
- la transition énergétique avec le scénario NégaWatt[9] (efficacité énergétique, sobriété énergétique, énergies renouvelables);
- la préservation de la biodiversité en tant que préoccupation intrinsèque à l'humanité;
- un urbanisme reconsidéré : densification urbaine, économie d'énergie, espace vert, etc.;
- des transports réorientés vers l'écomobilité;
- une fiscalité réorganisée pour inciter à plus d'économie et à réduire les déchets ou pollutions.

En résumé, la transition écologique doit nous pousser à aller vers un aggiornamento social, économique, environnemental et énergétique comme illustrée au niveau de la Figure 1.2.

En France, depuis novembre 2013 et la publication pour consultation du public du "Livre blanc sur le financement de la transition écologique"[10]; la transition écologique a pris de l'importance au sommet de l'État. Néanmoins, nous sommes en droit de nous demander si cette prise de conscience écologique était guidée par l'intérêt général ou simplement par l'intérêt de quelques groupes de lobbies[11]. En effet, depuis la fin de l'enquête sur l'avis du public en début 2014, aucun document n'est apparu par la suite afin d'en informer le public. Ce livre blanc définit notamment la transition écologique comme étant tout processus de transformation de l'économie visant à maintenir ces ressources et régulations en deçà de seuils critiques pour la viabilité de nos sociétés. Nous notons que la transition écologique se limite autour de la sphère économique et non sociétale, est-ce la raison pour laquelle il n'y a toujours

pas d'avancée sur ce projet, la question mérite d'être posée. Par ailleurs, nous pouvons affirmer que le système économique et social actuel basé sur le libre-échange généralisé, organisé par et pour les puissances qui possèdent le capital financier est incompatible avec la transition écologique. En effet, pour que cela puisse fonctionner, il faudrait que l'ensemble des pays dans le monde puisse jouir du même statut "d'égalité" dans les instances décisionnelles mondiales comme à l'ONU. Or il y a cinq pays possédant un droit de veto et les autres pays n'en ont pas.

Dans ce contexte, commencé déjà à agir au niveau de la transition énergétique, avant de monter à un niveau supérieur qui est la transition écologique, est pour le moment un moyen de résilience.

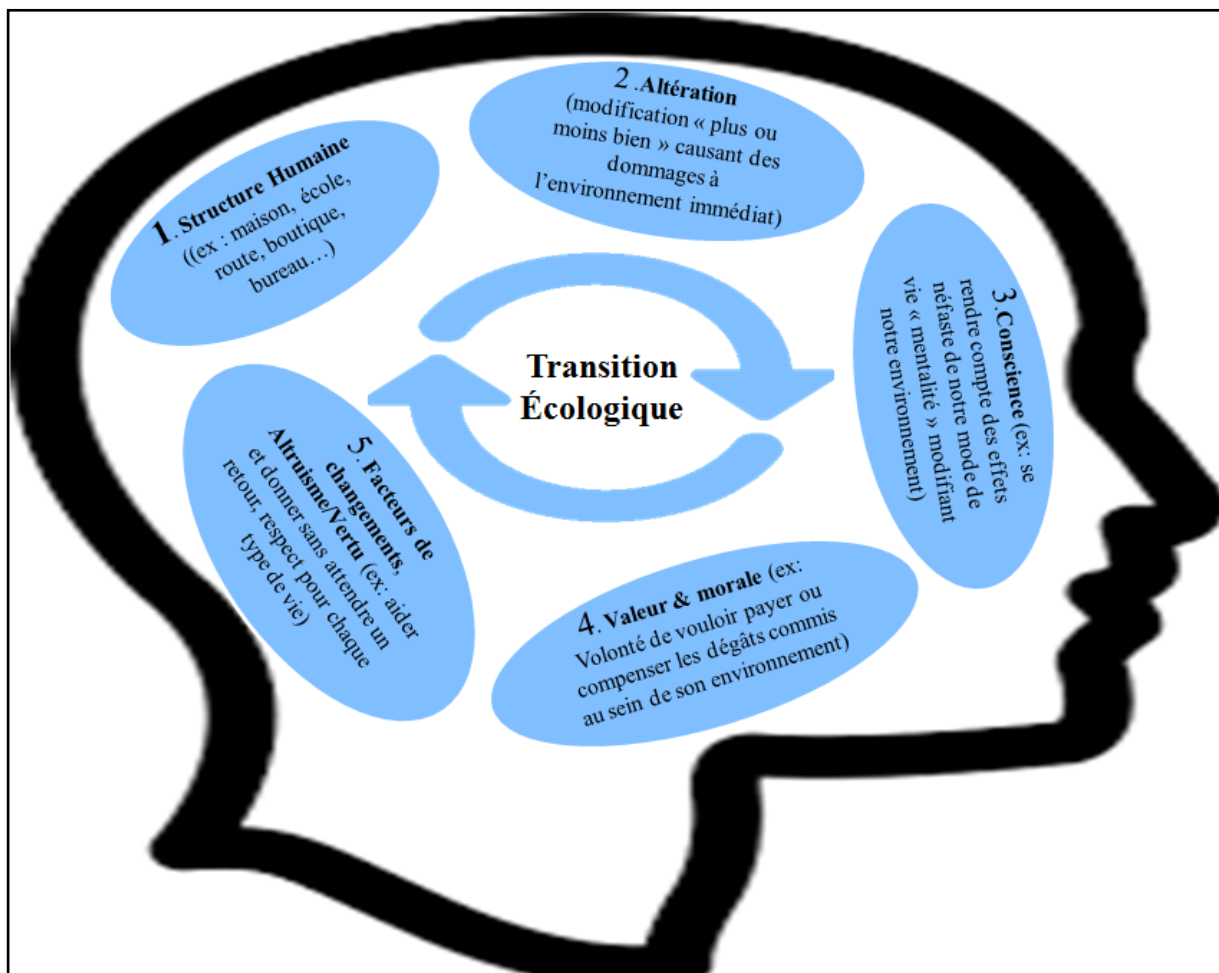


Figure 1.2 : La transition écologique
Auteur : El Assad

La Figure 1.2 décline les différentes notions de la transition énergétique en cinq principes selon l'auteur.

1.1.1.3 - Transition énergétique

Nous venons de voir précédemment que la transition énergétique représente une notion découlant de la transition écologique, c'est-à-dire que c'est l'une de ses composantes. Si la transition écologique vise à un changement de paradigme économique et sociétal dans lequel des notions comme équité, qualité, sobriété érigent les modes de consommation et de production; la transition énergétique quant à elle s'attaque à la consommation énergétique basée sur les énergies fossiles pour orienter la société vers des énergies plus propres, économes et sobres en ayant recours par exemple à de plus en

plus aux énergies renouvelables (EnR). Nous donnons ici l'exemple des énergies renouvelables, car dans la majorité des esprits en Occident, la notion de transition énergétique fait référence à la substitution d'un système énergétique basé essentiellement sur des sources d'énergie fossile à un système dont les énergies renouvelables vont prendre le pas. Cependant, la réalité est beaucoup plus complexe, car la priorité donnée à un type d'énergie sur le mix énergétique est en évolution selon l'état dans lequel l'individu se situe. Ce mix s'adapte aux aléas du milieu et de l'instant d'utilisation afin de satisfaire les besoins des consommateurs dans une logique d'indépendance énergétique. Par exemple, l'Allemagne a pour objectif l'arrêt de ces centrales nucléaires[12], au contraire de la France qui vise entre autres une politique décarbonée via le nucléaire[13], en plus du développement des EnR. Autre exemple aussi aux États-Unis, où la transition énergétique conduit à l'exploitation de ressources non conventionnelles tel que le gaz de schiste qui comme le nucléaire induisent d'autres types de pollution autres que les gaz à effet de serre. Cependant dans tous les pays, cette transition énergétique doit nécessairement s'accompagner d'efficacité et de sobriété énergétique et englobe en majorité les activités humaines. Dans le cas de la France, elle concerne plus spécifiquement la consommation énergétique des bâtiments. En effet, en France, le secteur du bâtiment concentre plus de la moitié de la consommation énergétique[14] et contribue fortement à l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Étant donné que, ce secteur présente un seuil de consommation très élevé, il est par conséquent le secteur sur lequel il est urgent et pertinent d'agir très fortement. Le pays doit faire face :

- À l'épuisement des énergies fossiles.
- À la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre qui sont l'un des principaux responsables du réchauffement climatique.
- À la hausse des factures d'énergie pour les ménages et les entreprises.
- Au nombre croissant de foyers en situation de précarité énergétique.

Pour relever ces défis, le pays doit faire appel à l'ensemble de ses forces vives pour mettre l'accent sur les économies et l'efficacité énergétique du secteur du bâtiment. Une loi a été notamment promulguée dans ce sens en août 2015 et s'intitule loi sur la transition énergétique pour la croissance verte[15]. Elle fixe notamment des objectifs et un cadre du nouveau modèle énergétique français et vise à servir différents enjeux.

Les principaux enjeux de la loi sur la transition énergétique sont :

- *ENJEU ENVIRONNEMENTAL* : pour enrayer le réchauffement climatique en développant la production d'énergie verte;
- *ENJEU SOCIÉTAL* : permettre l'égalité d'accès à l'énergie et la création d'emploi issu de l'économie verte;
- *ENJEU POLITIQUE* : lever le risque de dépendance énergétique de la France face aux pays producteurs d'énergies fossiles;
- *ENJEU ÉCONOMIQUE* : maîtriser la volatilité du coût des énergies tout en offrant de la flexibilité et de la compétitivité aux entreprises.

Pour avoir une référence chiffrée, certains enjeux ont été déclinés en objectifs, dont les principaux sont:

- diminuer de 40% les émissions de gaz à effet de serre en 2030 par rapport à 1990;
- réduire la consommation énergétique finale de 50% en 2050 par rapport à 2012;
- diminuer de 30% les consommations d'énergie fossile en 2030 par rapport à 2012;
- réduire de 50% les déchets mis en décharge à l'horizon 2025;
- augmenter le taux de recyclage des matières organiques pour atteindre 60% en 2025;
- réduire les tonnages stockés annuellement de 30% en 2020 et 50% en 2025;

- augmenter la valorisation énergétique des refus de tri, avec un encouragement à la préparation de CSR (Combustibles Solides de Récupérations);
- porter la part des énergies renouvelables à 32% de la consommation finale d'énergie en 2030 et à 40% de la production d'électricité;
- diversifier la production d'électricité et baisser à 50% la part du nucléaire à l'horizon 2025.

En France, le mix énergétique est essentiellement composé d'énergies fossiles et du nucléaire qui est à la base d'une autre source fossile, mais n'est pas considéré comme émettrice de gaz à effet de serre. Elle vise essentiellement une politique décarbonée en accentuant ces efforts au niveau de la sobriété et l'efficacité énergétique que sur la transition énergétique à proprement parler.

Pour conclure, la transition énergétique, qui est l'une des composantes de la transition écologique, occupe une place majeure dans le développement durable de la société. Selon, les états, elle se décline de différentes manières en gardant le même principe qui consiste à diminuer le rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Si nous arrivons à la réaliser, elle permettra de réduire les tensions géopolitiques mondiales dues aux inégalités de la répartition des ressources fossiles dans le monde. Cela, grâce à l'augmentation du taux d'indépendance énergétique des pays qui disposent de peu de ressources fossiles en se focalisant sur d'autres sources d'énergie valorisable localement, et en particulier basées sur les EnR. La Figure 1.3 ci-dessous présente une illustration de la transition énergétique.



Figure 1.3 : La transition énergétique
Source : cozynergy

La Figure 1.3 illustre de manière imagée les principaux objectifs de la transition énergétique énumérés un peu plus haut.

1.1.1.4 - Orientations stratégiques autour de la transition énergétique et écologique

La traduction en acte, des analyses menées autour du Développement Durable, de la transition écologique et de la transition énergétique nous conduit vers certaines orientations stratégiques qui nous ont inspirés dans la définition des objectifs que nous avons cernés dans ce travail de recherche. Il s'agit pour nous de contribuer à apporter des réponses autour de ces nouvelles orientations :

- Assurer plus de sobriété énergétique, une meilleure efficacité énergétique, des possibilités d'adaptation énergétique autour des postes de consommation énergétiques dans tous les secteurs d'activité : résidentiel, primaire, secondaire et tertiaire.
- Mettre en œuvre des bases de données et de connaissances de plus en plus détaillées autour de la consommation énergétique à différentes échelles d'observation.
- Assurer le développement de nouvelles technologies autour des processus de transformations et de fabrication de produits de l'ensemble des secteurs d'activité.
- Mettre en œuvre une approche raisonnée de la distribution de l'énergie associant notamment des outils numériques en termes d'analyse, de prédiction et de pilotage afin d'assurer une gestion intelligente de la distribution.
- S'inscrire dans une approche économique orientée sur le coût de production, de distribution de l'énergie, de traitement des impacts environnementaux et de l'accès à l'énergie.
- Aller vers un recours de plus en plus exclusif d'énergie renouvelable à faible impact environnemental afin de faire face au changement climatique et aux autres pollutions atmosphériques.
- Contribuer à une gestion durable des ressources énergétiques en lien avec les dispositifs de production, de stockage et de transport de l'énergie.
- Mettre en œuvre des bilans d'impacts environnementaux à différentes échelles d'observation des postes de consommation au territoire.
- Associer ces impacts environnementaux à une analyse de procédés pour tout système de consommation.
- Associer ces impacts aux flux matières en jeu dans tout système de consommation.

1.1.2 - Problématique énergétique au niveau mondial

1.1.2.1 - Ressources

Dans le monde, depuis la révolution industrielle, la consommation énergétique n'a cessé de croître. Cette croissance a été facilitée par des ressources énergétiques essentiellement fossiles (Pétrole, charbon, gaz et l'uranium) dont la répartition est bicornue à l'échelle terrestre. Elles sont inégalement réparties entre les pays producteurs comme illustrer sur la Figure.1.4. D'autres ressources énergétiques notamment autour, du solaire, du vent, de l'hydraulique, des biomasses sont aussi présentes, elles forment la famille des énergies renouvelables car elles sont inépuisables à l'échelle humaine en plus d'être moins nocifs pour l'être humain et son environnement. Ces énergies renouvelables, constituent une solution dans un proche avenir pour faire face à la pénurie prochaine des ressources fossiles et surtout des graves conséquences

qu'elles engendrent en raison de leur impacts environnementaux, notamment la pollution, le changement climatique, etc..

En ce qui concerne l'énergie solaire, par exemple, elle est présente sur toute la surface du globe. Cette ressource peut être considérée comme accessible en tout lieu et inépuisable. Encore faut-il pouvoir se l'approprier.

La Figure.1.4 ci-dessous montre la répartition de la production d'énergie primaire dans le monde entre 1989 et 1998.

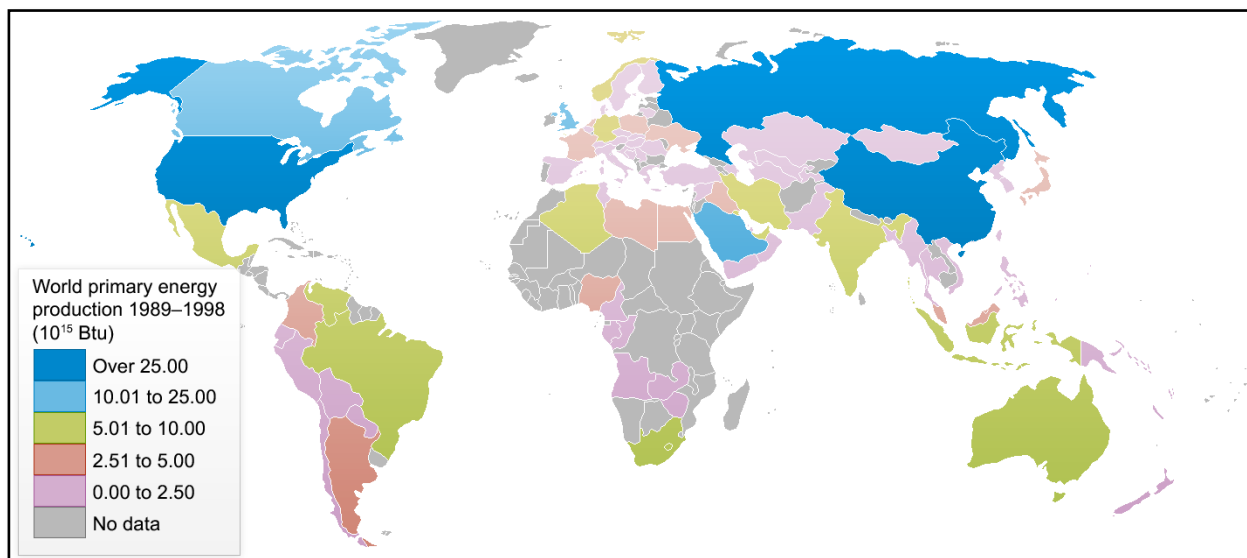


Figure.1.4 : Répartition de la production d'énergie primaire dans le monde entre 1989 et 1998
Source : Wikipédia[16]

Nous observons sur cette Figure.1.4 qu'il y a 6 pays qui produisent l'essentiel de l'énergie primaire au niveau mondiale, mais la nature de l'énergie produite varie selon le pays. Ainsi, la Chine produit principalement du charbon, la Russie produit du charbon, du gaz et du pétrole, les États-Unis produisent du charbon et du pétrole et l'Arabie Saoudite produit essentiellement du pétrole, etc. Sur la carte, nous constatons aussi que la majorité des pays se trouvant en Afrique ne sont pas comptabilisés par manque de donnée selon l'auteur de la carte.

D'après British Petroleum (BP)[17], en 2015, les réserves mondiales d'énergie non renouvelable (fossiles et uranium) étaient estimées à 946 milliards de tonnes d'équivalents pétrole (Mds tep). Cela correspond, en moyenne, à 80 ans de production au rythme actuel de la consommation mondiale, soit plus particulièrement 51 ans pour le pétrole, 53 ans pour le gaz et 114 ans pour le charbon. Le Tableau 1.1 donne un récapitulatif des réserves mondiales pour l'année 2014 par source d'énergie.

Tableau 1.1 : Réserves mondiales d'énergies et production annuelle 2014 par sources d'énergie

	Réserves mondiales (en unité physique)	Réserves mondiales (Gtep)	Réserves mondiales (en %)	Production annuelle (en Gtep)	Nombre d'années restant de production à ce rythme
Pétrole	1700 Gbbl	239	25%	4,4	51
Gaz naturel	187 Tm ³	168	18%	3,2	53
Charbon	892 Gt	431	45%	3,83	114
Uranium	5,7 Mt	50	6%	0,58	90
Thorium	6,4Mt	56	6%	ns	ns
Total conventionnel		944	100%	12,01	77
Hydroélectricité	8,9 pWh	2	0,002%	0,89	ns
Énergie éolienne	39 pWh	8,8	0,01%	0,13	ns
Solaire	1 070 000 pWh	92 000	99,90%	0,04	ns
Biomasse	3 × 10 ²¹ J	70	0,08%	1,41	ns
Total conventionnel		92 081	100%	2,47	ns

Source : BP

Nous constatons à travers ce Tableau 1.1 qu'à l'échelle humaine c'est l'énergie solaire qui possède le plus grand gisement de réserve, ensuite vient le charbon et le pétrole très loin derrière. À ce propos, si le soleil présente le gisement de réserve le plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie, en termes de pollution et de rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre le volume et l'impact ne sont plus les mêmes. En effet, la pollution du solaire n'est pas du tout la même comparée à celle du pétrole ou du charbon. L'émission du CO₂ par le soleil est juste nécessaire pour la survie des espèces. Le rejet à outrance du CO₂, et d'autres polluants par la consommation des énergies fossiles, a pour conséquence de modifier le cycle naturel au niveau de la Terre avec par moment des pics de chaleur ou de froid constatés selon les régions du globe[18].

1.1.2.2 - Impacts environnementaux

En 2013, d'après la banque mondiale[19], les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) par habitant ont été estimées à 5 tonnes inégalement réparties selon le territoire d'habitation. Selon les estimations de BP, en 2015, les émissions de CO₂ provenant de l'énergie ont atteint 33 508 Mt. Toujours selon ces sources, ce chiffre est en augmentation de 17,4% depuis 2005 et de 55,3% depuis 1990. L'augmentation de la concentration de CO₂ atmosphérique est l'une des causes du changement climatique par effet de serre et de l'acidification des océans. Il devient alors urgent d'agir en faveur de

la réduction du CO₂ présent dans l'atmosphère afin d'espérer atténuer ce phénomène de réchauffement climatique[20].

Les cartes ci-dessous reprennent les émissions de CO₂ par pays et par habitant pour chaque pays. Elles nous illustrent en détail ces rejets de CO₂ selon le territoire.

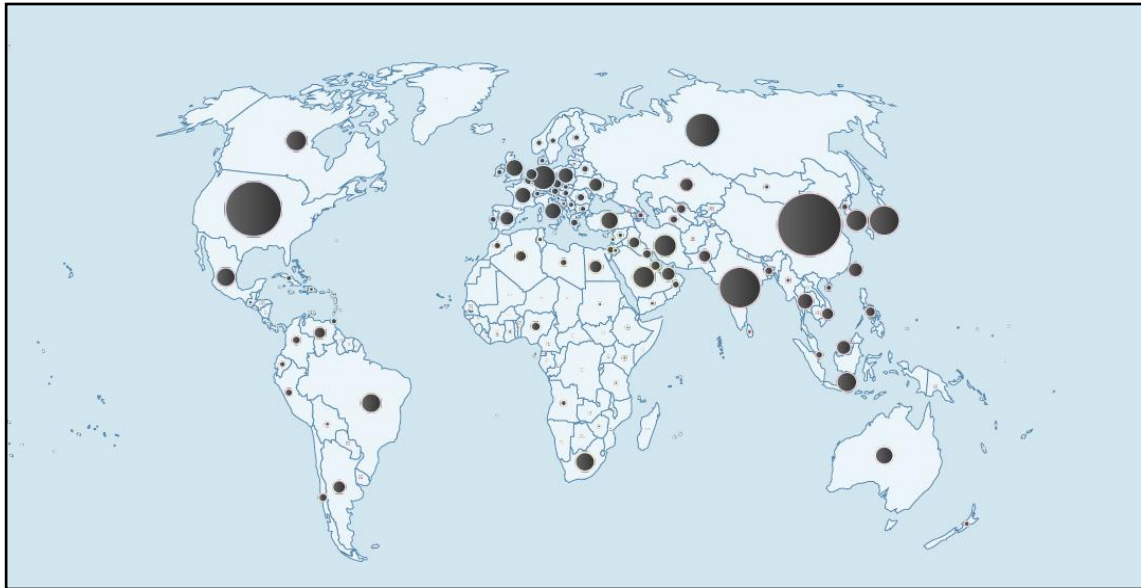


Figure 1.5 : Émissions de CO₂ par pays (MtCO₂)
Source: Globalcarbonatlas[21]

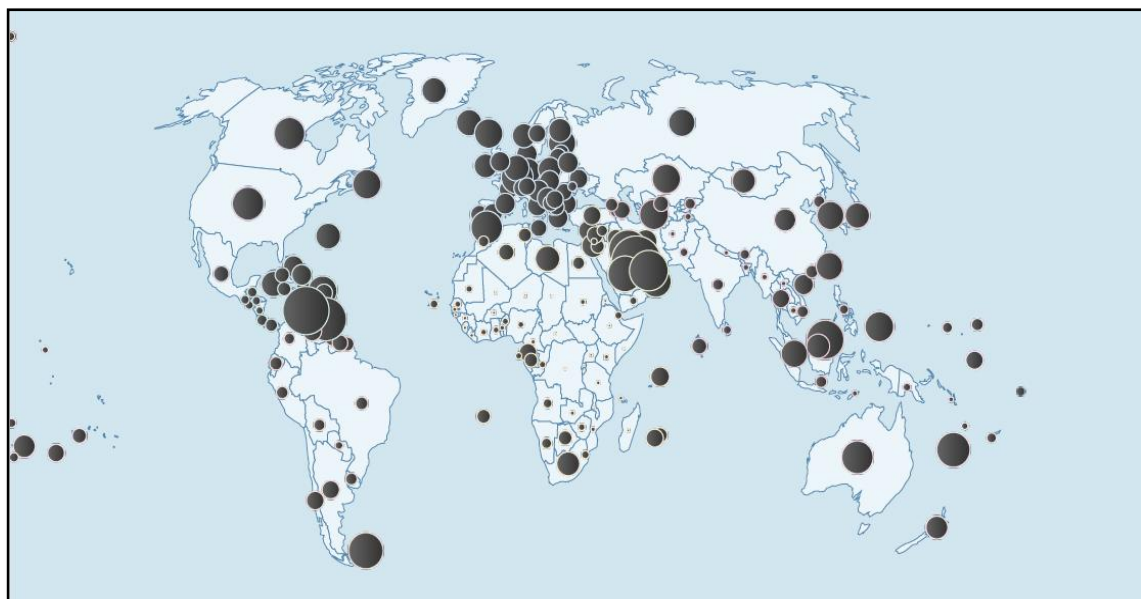


Figure 1.6 : Émissions de CO₂ par habitant (tCO₂)
Source : Globalcarbonatlas

Nous notons que ce sont les États-Unis, la Chine et l'Inde qui ont le taux de rejet de CO₂ par pays le plus importants. Ce qui peut-être expliqué par l'existence d'une industrie très énergivore qui occasionne une importante consommation d'énergie à l'origine de ces rejets de CO₂. Par ailleurs, en termes de rejet par habitant, nous observons que la part de la Chine et de l'Inde diminue sensiblement tandis que les pays du Moyen-Orient, de l'Asie du sud-est, de l'occident et de l'Amérique central occupent une place importante. Cette différence entre émissions de CO₂ par pays et émissions par habitant peut être expliquée par le fait qu'au niveau du pays ce sont surtout les industries lourdes qui

concentrent le rejet de CO₂ le plus élevés et que le rejet par habitant dépend en premier lieu de la richesse de la population locale. Nous pouvons avancer, avec prudence, que plus la population majoritaire est citadine et plus le ratio d'émissions de CO₂ par habitant sera élevé et inversement.

1.1.3 - Problématique énergétique en France métropolitaine

1.1.3.1 - Ressources

La Figure.1.4 nous permet de visualiser que la France produit peu d'énergie primaire, car elle manque de ressources énergétiques propres comparée au Royaume-Uni ou à l'Arabie Saoudite par exemple. Cependant, d'après le bilan énergétique de la France (BEF 2015) de 2015[22], la France a produit 1,2 Mtep de pétrole, ce qui représente sa seule source énergétique d'origine fossile exploitée en 2015. En effet, les productions de gaz et de charbon ont été arrêtées respectivement en 2013 et 2015.

Le Tableau 1.2 nous permet de visualiser les échanges énergétiques de la France en 2015.

Tableau 1.2 : Échanges énergétique de la France en 2015 [Mtep]

		2015
Importation	Charbon	8,4
	Pétrole brut	57,4
	Produits pétroliers raffinés	41,2
	Gaz	39,3
Total importations		147,7
Exportations	Produits pétroliers raffinés	21,6
	Électricité	6,4
Total exportations		33,1

Source : BEF 2015

Sur 180,8 Mtep de flux échangés en 2015, il y a 81,7% des parts du à l'importation et 18,3% des parts du à l'exportation. Ce Tableau 1.2 permet de visualiser que la France est dépendant énergétiquement de l'extérieur. La Figure 1.7 nous permet de visualiser la part de chaque produit échangé.

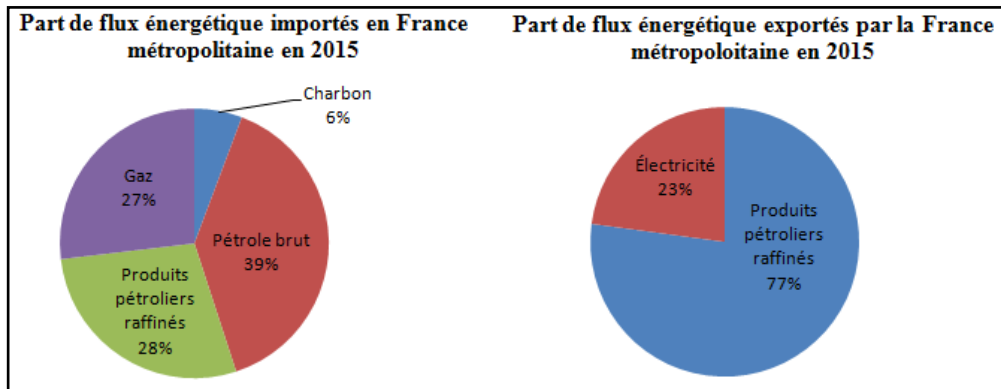


Figure 1.7: Part de chaque produit énergétique importé et exporté par la France en 2015
 Source : BEF 2015

Maintenant que nous avons vu les échanges énergétiques, intéressons-nous à la production d'énergie primaire en France en 2015. La Figure 1.8 permet de visualiser que la production d'énergie primaire ne cesse de croître au fil des années, c'est particulièrement marquant pour la ressource nucléaire. Étant donné que le France n'est pas un pays producteur d'uranium pour son utilisation dans le nucléaire, elle est obligée d'importer cette matière première. Ce qui place la France comme pays fortement dépendant des pays exportateurs d'uranium pour sa production énergétique primaire.

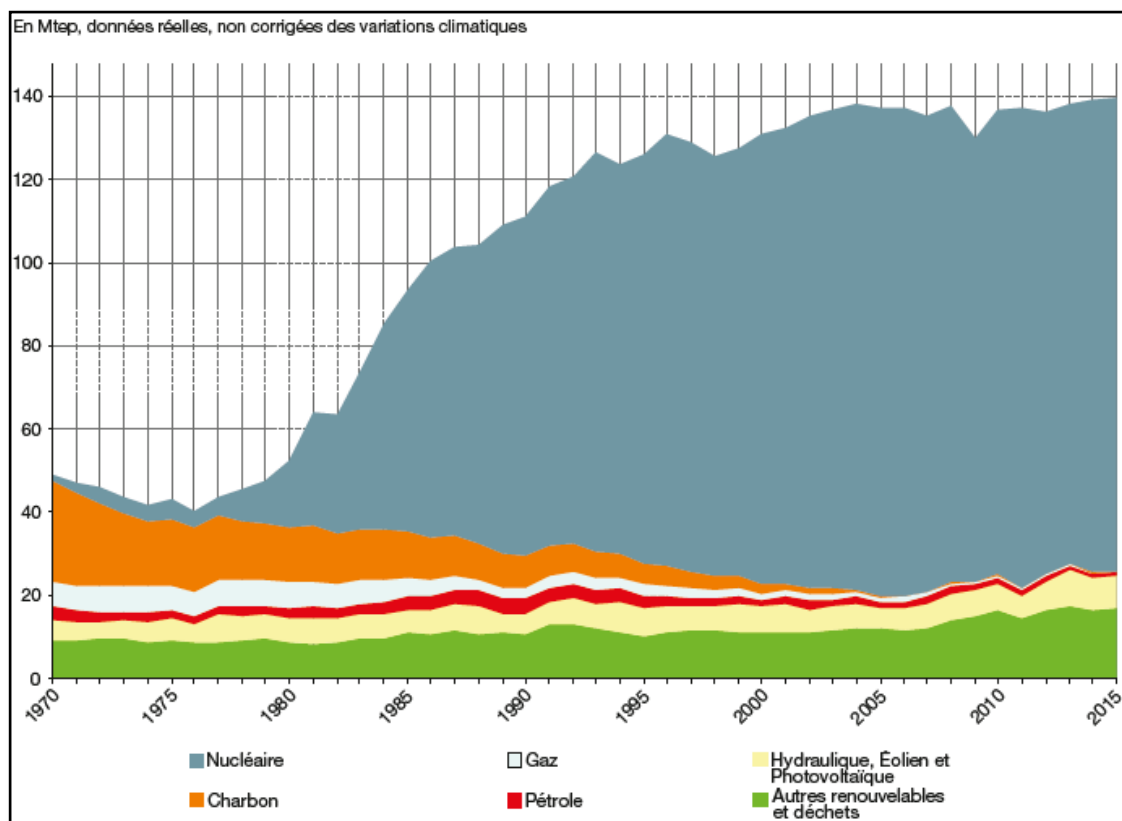


Figure 1.8 : Évolution de la production d'énergie primaire entre 1970 et 2015 en France [Mtep]
 Source : Bilan énergétique de la France (BEF) édition 2015

Si par exemple, nous nous intéressons exclusivement à la production électrique en France en 2015, nous remarquons que c'est le nucléaire qui détient plus de 75% des parts de production, ce qui justifie encore notre point de vue comme quoi la France est très dépendante de l'extérieur car elle ne produit pas du tout d'uranium. Elle produit de l'électricité en associant des ressources fossiles et renouvelables.

Elle possède un potentiel solaire dû au flux solaire qu'elle reçoit durant une année comprise entre 1200 et 1800 kWh par m² par an[23].

La Figure 1.9 donne une visualisation du mix électrique de la France en 2015. Elle permet aussi d'observer que la part de la production locale est de 17,5% (hydraulique, éolien, PV, bioénergies) et tous le reste est issu de l'importation.

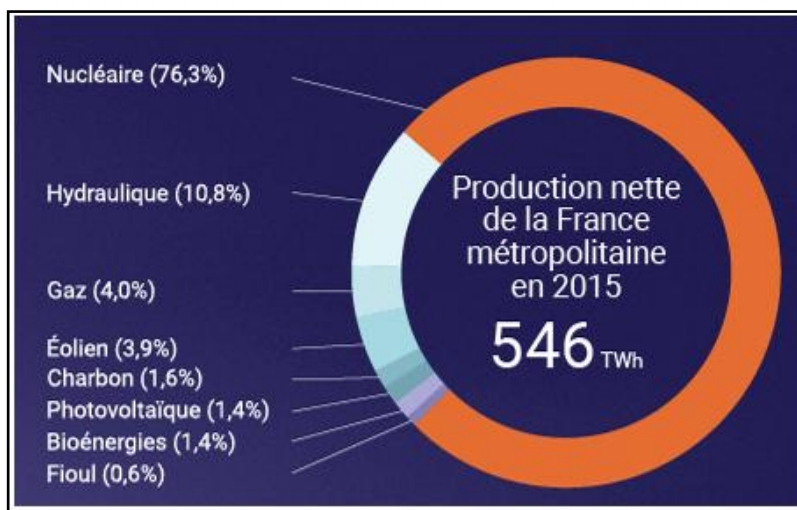


Figure 1.9 : Part de chaque forme d'énergie dans le mix électrique de la France en 2015[24]

Concernant la consommation d'énergie primaire, elle aussi s'accroît d'année en année comme pour la production afin de répondre au mieux à la demande du territoire. La Figure 1.10 donne plus d'indication sur le bouquet de la consommation énergétique en 2015.

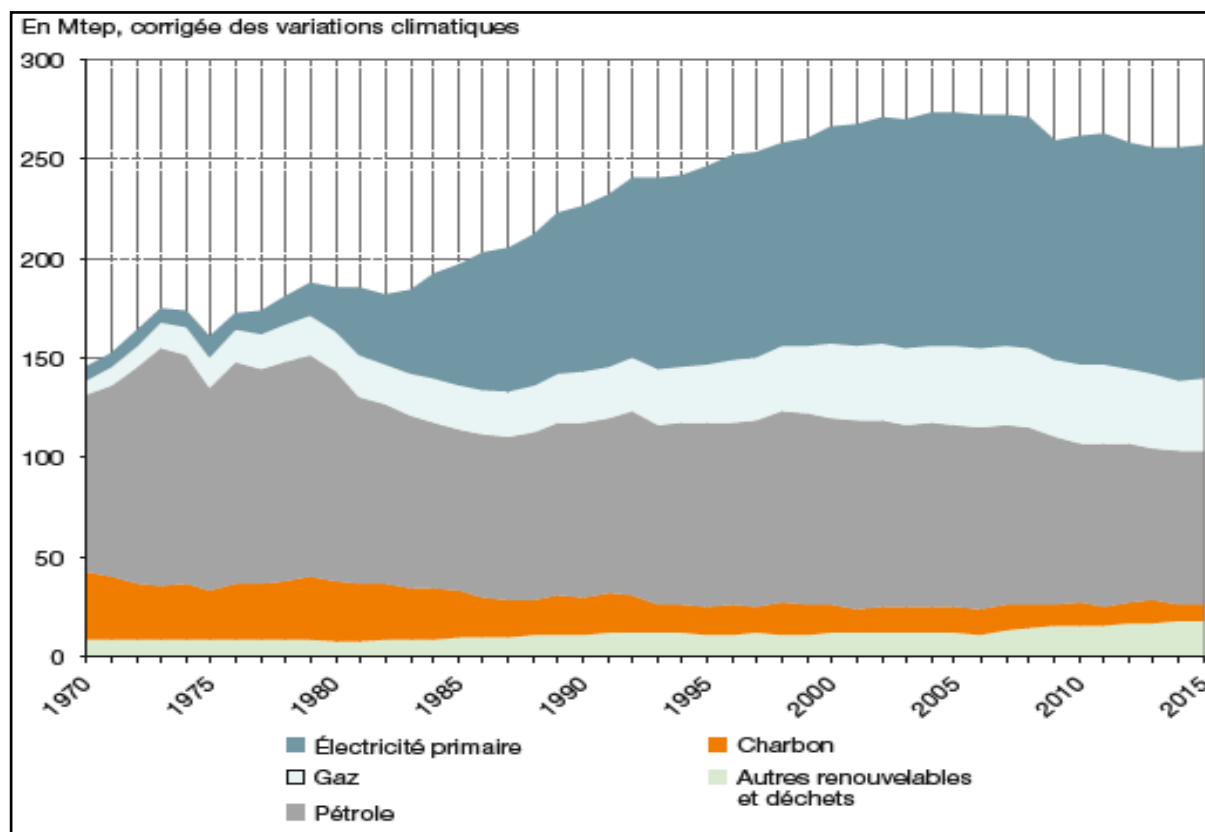


Figure 1.10 : Évolution de la consommation d'énergie primaire par forme d'énergie [Mtep]
Source : BEF 2015

Au delà, de cette consommation d'énergie primaire, nous avons la consommation d'énergie finale qui se caractérise comme illustrée au niveau de la Figure 1.11.

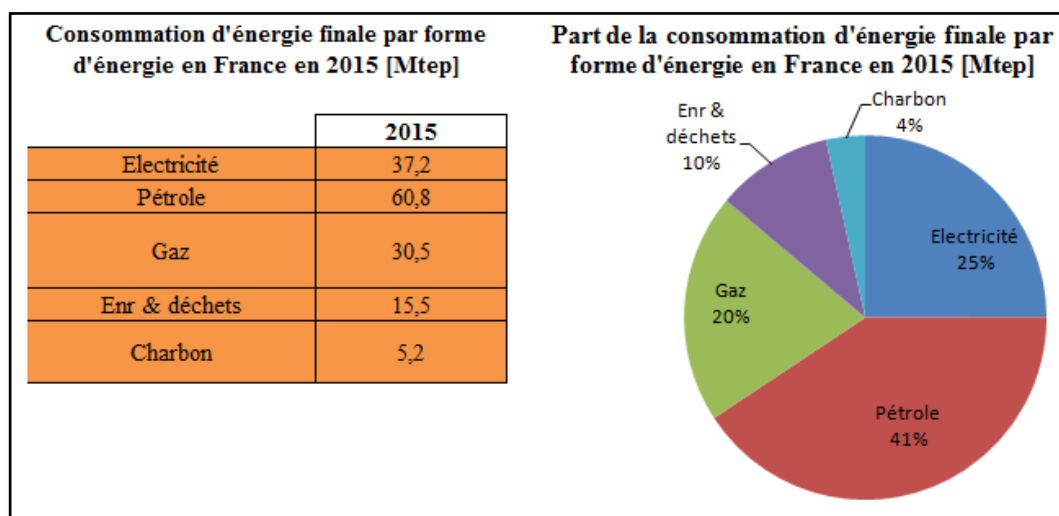


Figure 1.11 : Consommation d'énergie finale par forme d'énergie en France en 2015 [Mtep]
Source : BEF 2015

En France, il existe plusieurs formes d'énergie qui sont utilisées afin de répondre à la demande. Dès lors, comment cette énergie est-elle consommée selon les secteurs d'activité? La Figure 1.12 donne des explications à ce sujet.

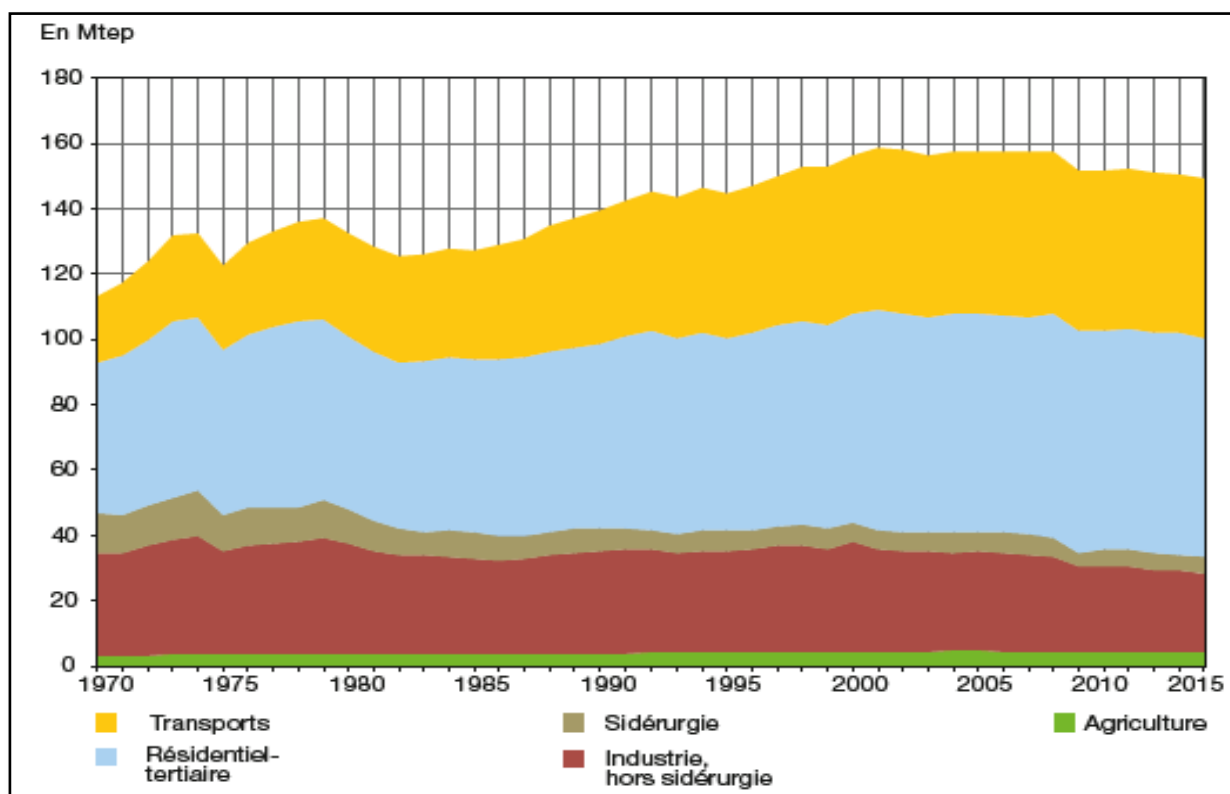


Figure 1.12 : Évolution de la consommation finale énergétique par secteur [Mtep]
Source : BEF 2015

En analysant cette carte, nous constatons une diminution de la consommation finale énergétique du secteur sidérurgie et industrie. Ce qui peut être traduit par la fermeture progressive des usines de sidérurgie et d'industrie.

A présent, nous allons nous intéresser exclusivement à la consommation énergétique finale liée à l'électricité. La Figure 1.13 montre l'évolution de la consommation finale d'électricité selon le secteur d'activité.

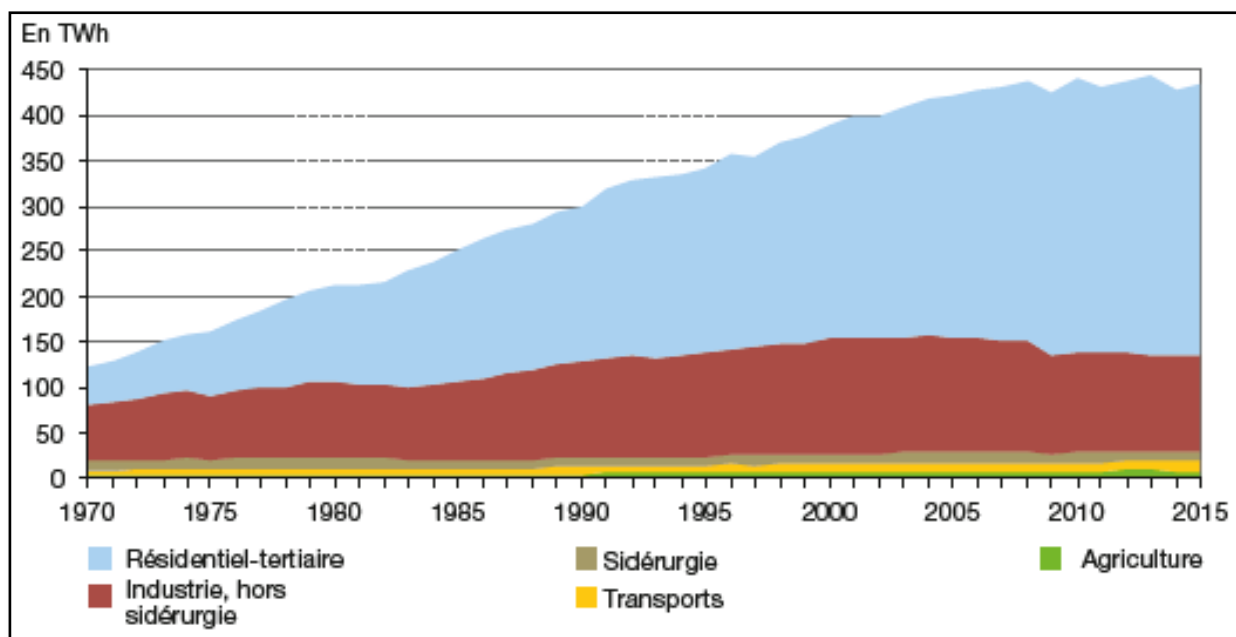


Figure 1.13 : Évolution de la consommation finale d'électricité par secteur
Source : BEF 2015

Nous remarquons sur cette Figure 1.13 que la hausse de la consommation finale d'électricité est surtout portée par le secteur résidentiel-tertiaire. Néanmoins, nous observons qu'à partir de 2010, la consommation électrique du résidentiel-tertiaire est en situation quasi-stationnaire. Nous supposons que ce phénomène peut-être expliquer par la crise survenu en 2008, qui freine l'évolution de la consommation dans le secteur résidentiel-tertiaire et par extrapolation aux autres secteurs d'activité aussi.

À titre d'information, nous donnons sur le Tableau 1.3 la consommation électrique par secteur en 2015 [Mtep].

Tableau 1.3 : Consommation électrique par secteur en 2015 [Mtep]

Secteur	Données
Résidentiel & tertiaire	25,7
<i>dont résidentiel</i>	13,3
<i>dont tertiaire</i>	12,4
Transport	0,9
Industrie	10
Agriculture-Pêche	0,7
Total	63

Nous remarquons à l'aide de ce Tableau 1.3 que la consommation électrique en France est surtout porter par le secteur résidentiel-tertiaire, ce qui est caractéristique d'un pays où le secteur tertiaire (ou des services) occupe une place importante. Le secteur de transport est plus consommatrice d'électricité que le secteur d'agriculture-pêche, cela peut-être expliqué par l'apparition des voitures électriques.

1.1.3.2 - Impacts environnementaux

Compte tenu que l'uranium ne rejette pas de CO₂ pendant le processus de transformation afin d'obtenir de l'électricité, l'impact environnemental de la France, au niveau de la consommation électrique, est marginal par rapport au reste du monde car elle produit l'essentiel de son électricité à partir de l'uranium. Pour rappel, l'uranium est une ressource fossile, néanmoins son utilisation pour la production électrique rejette essentiellement de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. L'impact environnemental lié aux autres consommations énergétiques est relativement conséquent, en lien notamment avec les transports, l'industrie et le chauffage. Nous avons vu précédemment que la France produit 1,2 Mtep de pétrole qui occasionne des rejets de gaz à effet de serre certes, mais reste négligeable comparé à sa consommation d'énergie primaire de pétrole qui s'élève à 77,2 Mtep.

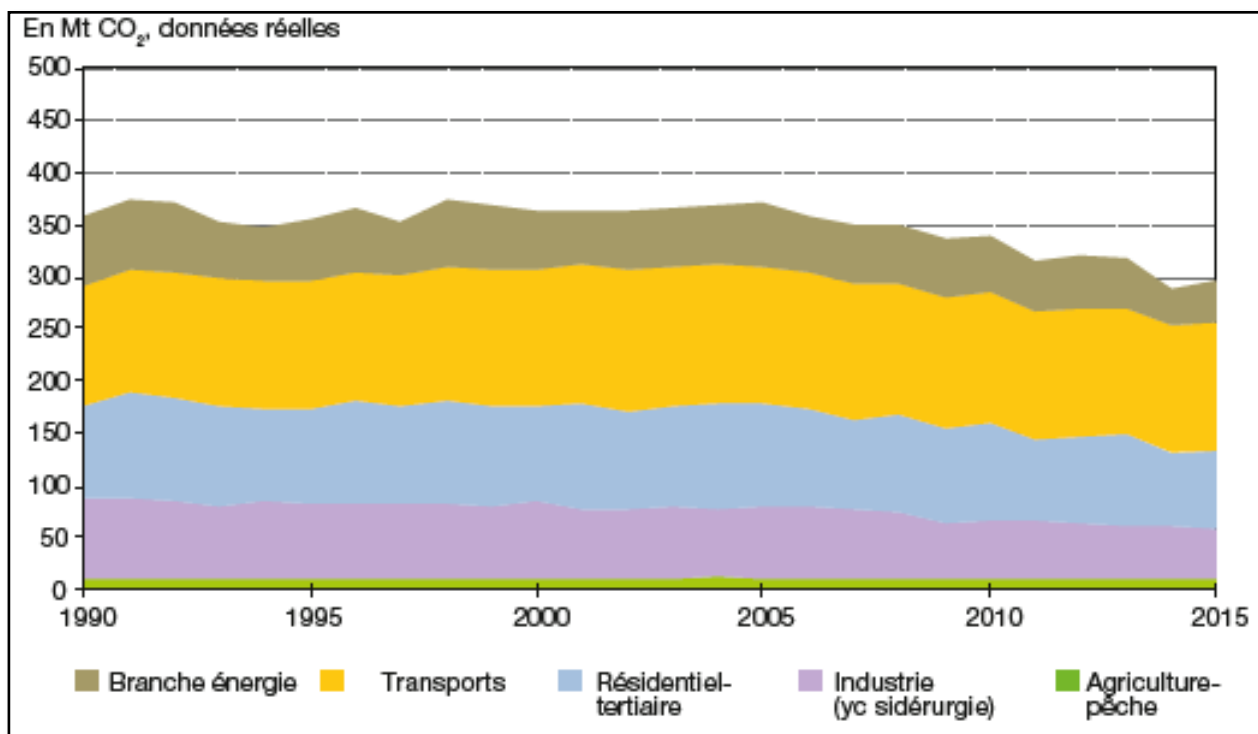


Figure 1.14 : Évolution des émissions de CO₂ dues à la combustion d'énergie par secteur
Source : BEF 2015

D'après la Figure 1.14, nous observons que l'évolution générale des émissions de CO₂ en France est à la baisse par rapport aux années 1990. Nous remarquons qu'à partir de 2005, la France a entamé une phase de baisse de ces rejets de CO₂ et que cette baisse c'est réellement manifestée vers 2008. En effet, en 2008, il y a eu une grande crise économique planétaire débutée au USA par une crise de l'immobilier et ayant eu des répercussions au niveau mondial. Nous supposons que cela a eu un impact non négligeable au niveau de la consommation énergétique. C'est-à-dire que la consommation énergétique a diminué ce qui a eu pour conséquence de faire diminuer les émissions de rejet de CO₂. Toutefois, le développement des EnR peut aussi avoir eu un impact au niveau des émissions de CO₂ mais l'impact est moindre par rapport à celui causé par la crise. En effet, depuis 2000, la France avait commencé à développer les sources d'EnR utilisant le solaire[25], cependant il y a eu une hausse limitée des rejets de CO₂ après le développement d'autres types d'EnR comme montrer sur la Figure 1.14.

Par ailleurs entre 1990 et 2015, nous notons que seul le secteur du transport a vu ces rejets de CO₂ maintenus voir même augmentés. Cela peut-être expliqué par l'évolution du parc automobile et des déplacements.

1.1.4 - Problématique énergétique à La Réunion

1.1.4.1 - Ressources

La Réunion ne possède pas de sources d'énergie primaires fossiles sur son sous-sol. En revanche, elle possède d'autres sources énergétiques toutes renouvelables. Afin de répondre à la totalité de sa demande énergétique, elle emploie différents ressources énergétiques. Le Tableau 1.4 rend compte de la production d'énergie primaire à la Réunion en 2015.

Tableau 1.4 : Production d'énergie primaire à la Réunion [ktep]

		Ressources	Valeurs	
Production importée	Charbon	Houille	411,1	
	Total Charbon		411,1	
	Produits pétroliers	Essence		92,4
		Gazole		393
		Fioul lourd		142
		Carburacteur		177,5
		Gaz butane		22,8
Huiles usagées		1,2		
Total produits pétroliers		828,9		
Production locale	Biomasse	Bagasse		105,3
		Biogaz		4,6
		Bois		-
	Total biomasse		109,9	
	Hydraulique	Hydraulique		42,7
	Total hydraulique		42,7	
	Solaire	Photovoltaïque		21
		Solaire thermique		20,3
Total solaire		41,3		
Vent	Éolien		1,3	
Total vent		1,3		
			Part du total	
Total		1435,2	100%	
		dont importée	1238,8 86,3%	
		dont locale	196,4 13,7%	

Source : Bilan énergétique de la Réunion 2015 (BER 2015) [26]

En nous intéressant exclusivement à la production électrique, nous pouvons nous référer au Tableau 1.5 pour en visualiser les aspects.

Tableau 1.5 : Répartition de la production électrique à la Réunion en 2015 selon la source d'énergie

			Entrants de production		Production	
			Tonne	ktep	GWh	ktep
Production importée	Charbon	Houille	627 129	388,2	1 168,80	100,5
	Total charbon		627 129	388,2	1 168,80	100,5
	Produits pétroliers	Gazole	5 799	5,8	678,7	58,4
		Fioul lourd	136 260	129,7		
Huiles usagées*		1 280	1,2	voir charbon		
Total produits pétroliers		143 339	137	678,7	58,4	
Production locale	Biomasse	Bagasse	569 262	105,3	269,6	23,2
		Biogaz	3 491	4,6	17	1,5
	Total biomasse		572 753	110	287	25
	Hydraulique	Hydraulique	-	42,7	496,3	42,7
		Total hydraulique		-	42,7	496,3
	Solaire	Photovoltaïque	-	21	244,4	21
		Total solaire		-	21	244,4
	Vent	Eolien	-	1,3	15,6	1,3
		Total vent		-	1,3	15,6
	Stockage	Batterie NAS	-	-	0,8	0,1
Total stockage		-	-	0,8	0,1	
Total				699,8	2 891,2	248,7
dont importée				523,7	1 847,50	158,9
dont locale				174,9	1 043,7	90
Part du total				100%	100%	100%
dont importée				75%	64%	64%
dont locale				25%	36%	36%
* Les huiles usagées sont brûlées directement avec le charbon. On ne peut distinguer les productions électriques de ces deux sources.						

Source : BER 2015

Au vue des parts d'entrants de production et des résultats de la production électrique à la Réunion, nous pouvons dire que le rendement des productions locales est plus élevé que celui des produits importés.

En ce qui concerne, la consommation d'énergie primaire pour la Réunion, elle s'élevait à 1411,2 ktep en 2015 répartie inégalement à travers différentes sources énergétiques. La Figure 1.15 illustre l'évolution de la consommation d'énergie primaire entre 2000 et 2015.

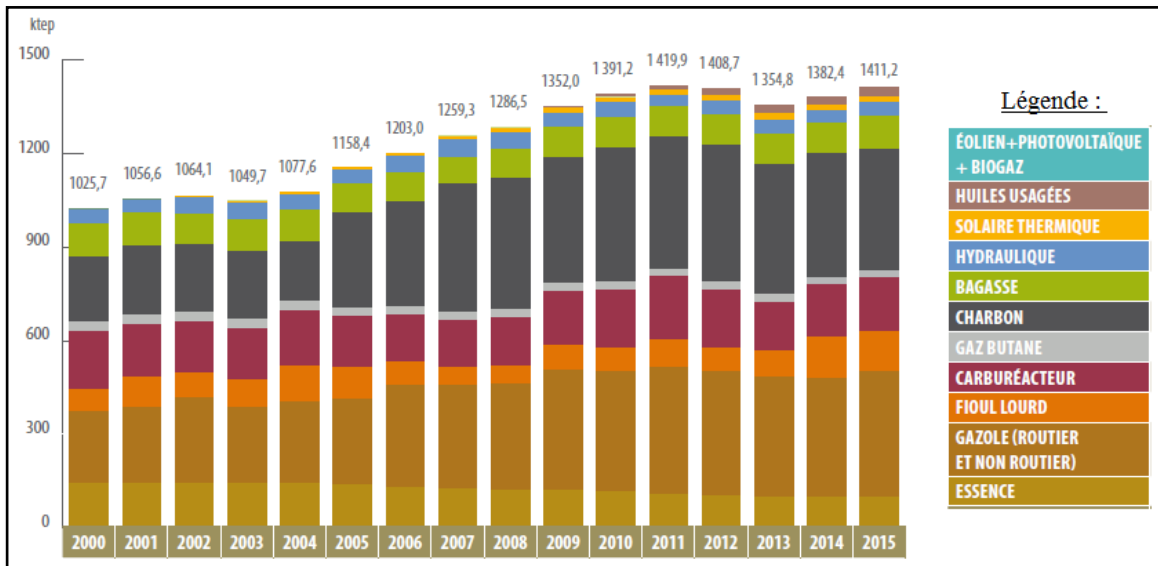


Figure 1.15 : Évolution de la consommation d'énergie primaire de 2000 à 2015 [ktep]
Source : BER 2015

Pour la répartition de la consommation d'énergie finale, nous avons la Figure 1.16 qui rend compte de l'évolution de la situation entre 2000 et 2015.

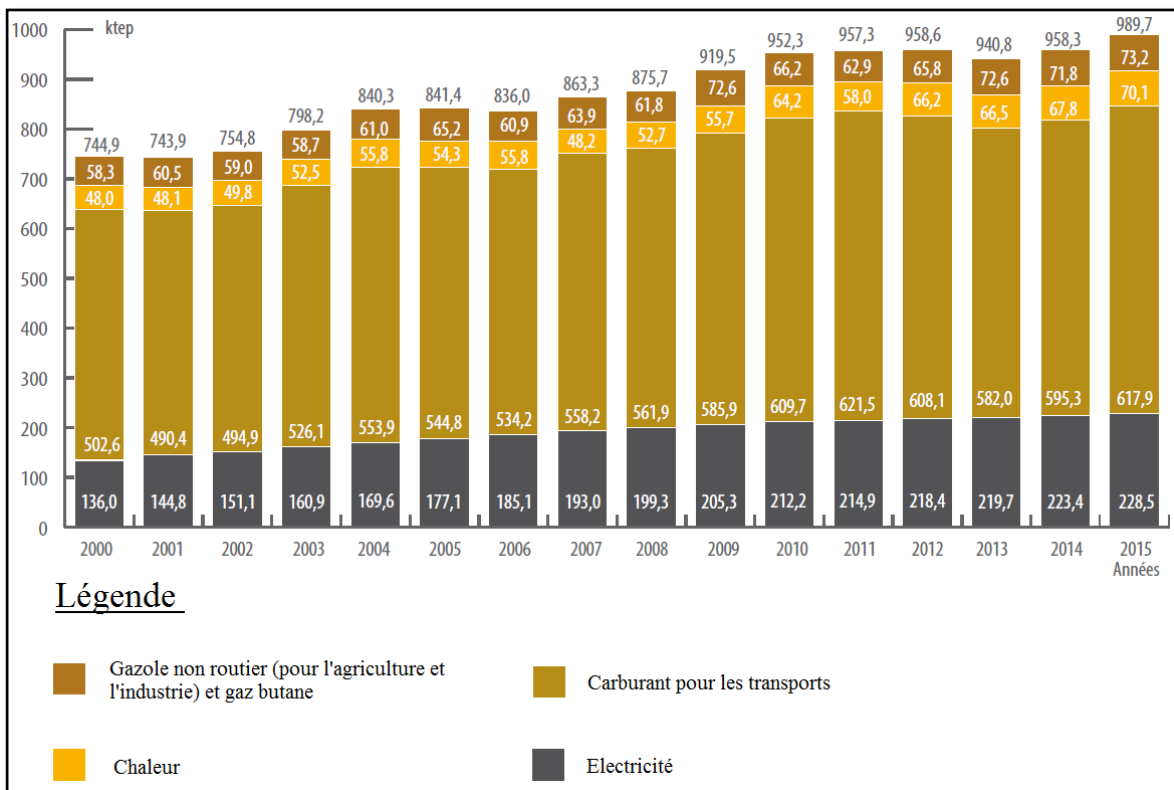


Figure 1.16 : Répartition de la consommation d'énergie finale de 2000 à 2015 à la Réunion [ktep]
Source : BER 2015

La Figure 1.17 reproduit de manière spécifique la part de chaque consommation d'énergie finale par secteur en 2015.

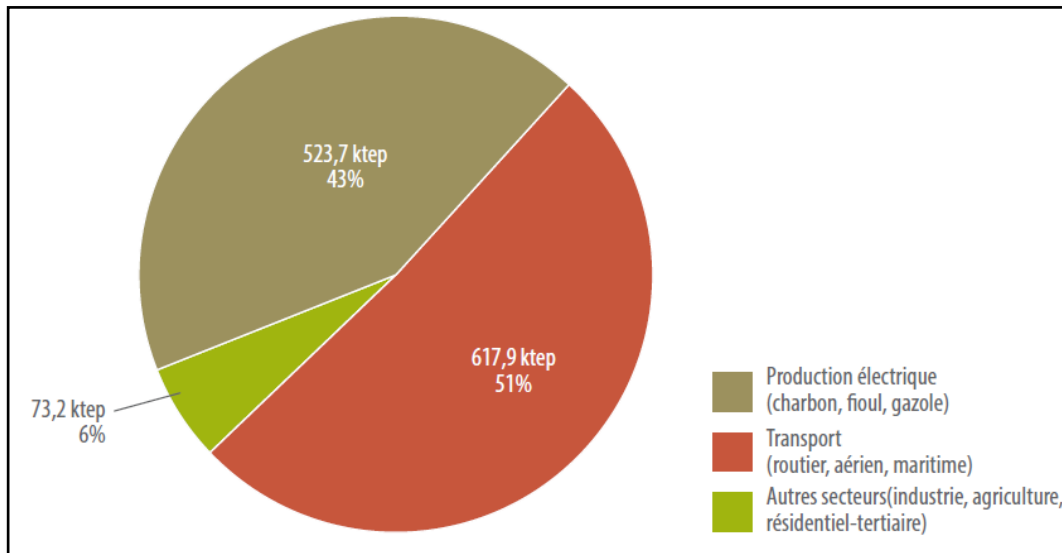


Figure 1.17 : Part de la consommation d'énergie fossile par secteur à La Réunion en 2015 [ktep]
Source : BER 2015

Nous observons que l'électricité occupe une place importante dans la consommation énergétique finale. La Figure 1.18 montre en détail la répartition de cette consommation électrique selon les différents secteurs d'activité.

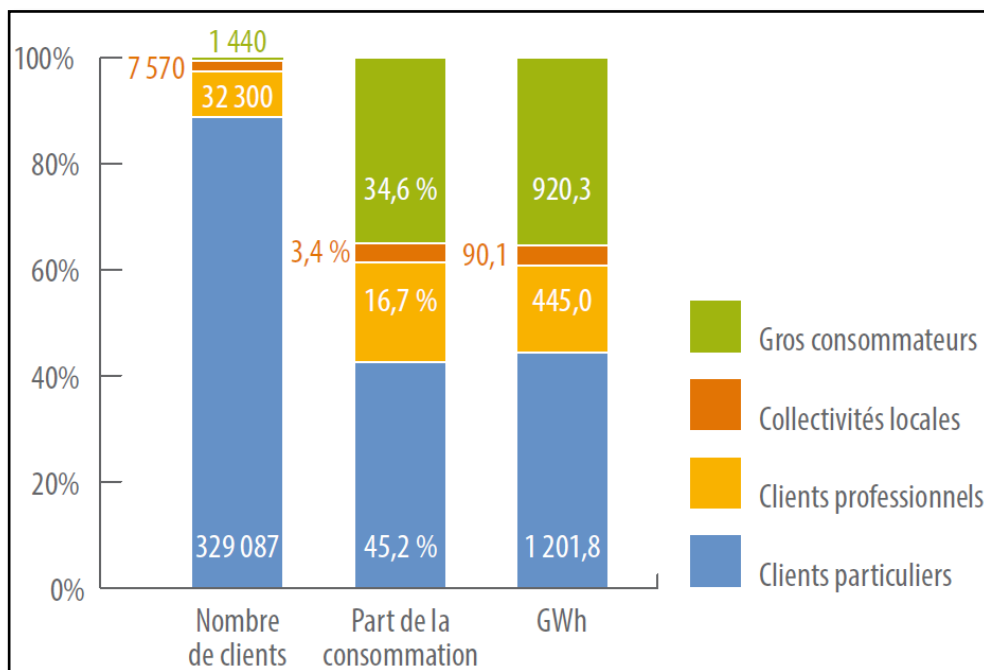


Figure 1.18 : Consommation électrique par type de client en 2015
Source : BER 2015

1.1.4.2 - Impacts environnementaux

D'après le BER 2015, les impacts environnementaux, dus à l'utilisation des énergies fossiles, étaient de 4 042 [ktCO₂ éq] répartis entre le secteur d'énergie (électricité), le secteur du transport et le secteur industriel (les autres carburants). Les secteurs d'énergie et du transport se partagent un peu moins de la totalité de ces émissions avec une part de 47,3% pour chacun des deux, ce qui représente

environ 1912 [ktCO₂ éq] par secteur. Le secteur industrie (autres carburants) participe quant à lui à 5,4% des émissions totales, ce qui équivaut à 218 [ktCO₂ éq]. Pour information, le ratio d'émissions de CO₂/hab était de 4,79 [tCO₂ éq/hab] en 2015. Le Tableau 1.6 ci-dessous illustre ces données.

Tableau 1.6 : Émissions des GES par secteur à La Réunion en 2015

Sous-thèmes	Indicateurs	Unité	2014	2015	2015/2014
Émissions de GES	Émissions totales	ktCO ₂ éq	4 196	4 042	-3,7 %
	Part électricité	%	47,4 %	47,3 %	-0,1 point
	Part transports	%	47,5 %	47,3 %	- 0,2 point
	Part des autres carburants	%	5,1 %	5,4 %	+0,3 point
	Ratio CO ₂ /hab	tCO ₂ éq/hab	5	4,79	-4,2 %
	Facteur d'émissions d'électricité	gCO ₂ /kWh	766	720	-6 %

Source : BER 2015

Nous observons sur ce Tableau 1.6 une diminution presque générale des émissions de GES entre 2014 et 2015 sauf pour celui du secteur industrie (autres carburants). Nous pouvons supposer que l'activité de l'industrie a connu une légère augmentation entre 2014 et 2015.

1.1.5 - Problématique énergétique à Mayotte

1.1.5.1 - Ressources

Mayotte ne dispose pas de sources d'énergie primaires fossiles. Ne disposant pas de données des ressources locales pour l'année 2015, nous allons nous baser sur les données du bilan énergétique mahorais de 2011 (BEM 2011) [27] afin d'avoir des informations sur la situation énergétique locales. Durant l'année 2011, les ressources de l'île de Mayotte en termes d'énergie étaient composées de ressources fossiles et un peu de renouvelable comme illustré sur le Tableau 1.7.

Tableau 1.7 : Production d'énergie primaire à Mayotte [tep]

		Ressources		Valeurs Production	
Production importée	Produits pétroliers	Gazole		70 673	
		Essence		11 563	
		Avgas		68	
		Carburéacteur		4 525	
		Pétrole lampant		2 866	
		Gaz butane		3 311	
		Charbon de bois		534	
Production locale		Huiles usagées		44	
	Total produits pétroliers			93 584	
	Solaire	Photovoltaïque		1 192	
		Solaire thermique		88	
Total solaire			1 280		
				Part du total	
Total				94 864	100%
dont importée				93 540	98,6%
dont locale				1 324	1,4%

Source : BEM 2011

Ce Tableau 1.7 nous montre clairement que l'île de Mayotte importe la quasi-totalité de ces besoins énergétiques. Lorsque nous faisons un focus sur la production électrique, nous obtenons le Tableau 1.8 suivant.

Tableau 1.8 : Répartition de la production électrique à Mayotte en 2015 selon la source d'énergie

			Entrants de production		Production	
			Tonne	tep	MWh	tep
Production importée	Produits pétroliers	Gazole	51 922	51 922	248 061	21 333
		Huiles usagées*	107	97		
Total produits pétroliers			52 029	52 019	248 061	21 333
Production locale	Solaire	Photovoltaïque	-	1 192	13 854	1 192
		Total solaire	-	1 192	13 854	1 192
Total				53 211	261 915	22 525
dont importée				51 922	248 061	21 333
dont locale				1 289	13 854	1 192
Part du total				100%	100%	100%
dont importée				97,6%	94,7%	94,7%
dont locale				2,4%	5,3%	5,3%

* Les huiles usagées sont brûlées directement avec le gazole. On ne peut distinguer les productions électriques de ces deux sources.

Source : BEM 2011

Nous remarquons que le rendement de la production locale est meilleur que celui de la production importée.

Passons à présent à la consommation d'énergie primaire, elle était de 95 965 tep en 2011 répartie sur plusieurs sources d'énergie comme montrer au niveau du Tableau 1.9.

Tableau 1.9 : Consommation primaire en 2011 à Mayotte

		Ressources	Tonne	MWh	tep
Production importée	Produits pétroliers	Gazole	71 637	-	71 637
		Essence	12 229	-	12 816
		Avgas	50	-	52
		Carburacteur	4 183	-	4 384
		Pétrole lampant	2 769	-	2 902
		Gaz butane	2 552	-	2 797
		Charbon de bois	-	-	-
Production locale	Total produits pétroliers		93 527	-	94 685
	Solaire	Photovoltaïque	-	13 865	1 192
		Solaire thermique	-	1 019	88
	Total solaire		-	14 884	1 280
				Part du total	
Total			95 965		100%
dont importée			94 588		98,6%
dont locale			1 377		1,4%

Source : BEM 2011

La répartition de l'énergie finale entre 2002 et 2011 est donnée par la Figure 1.19.

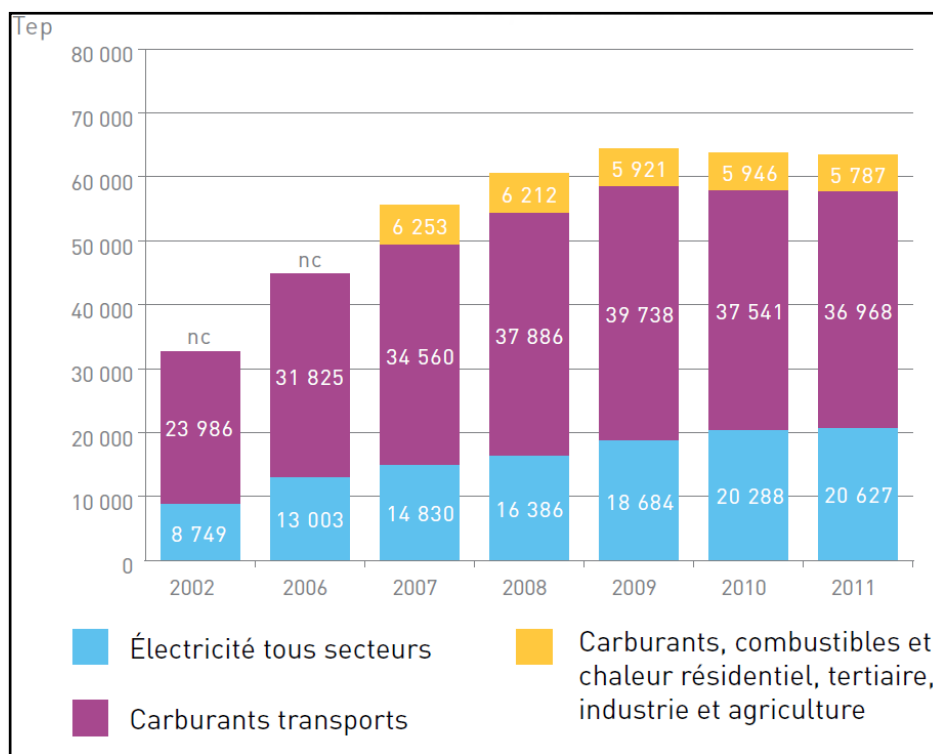


Figure 1.19 : Évolution des consommations finales d'énergie de 2002 à 2011

Source : BEM 2011

En ramenant en pourcentage ces données, nous obtenons le résultat de la Figure 1.20 issu du BEM.

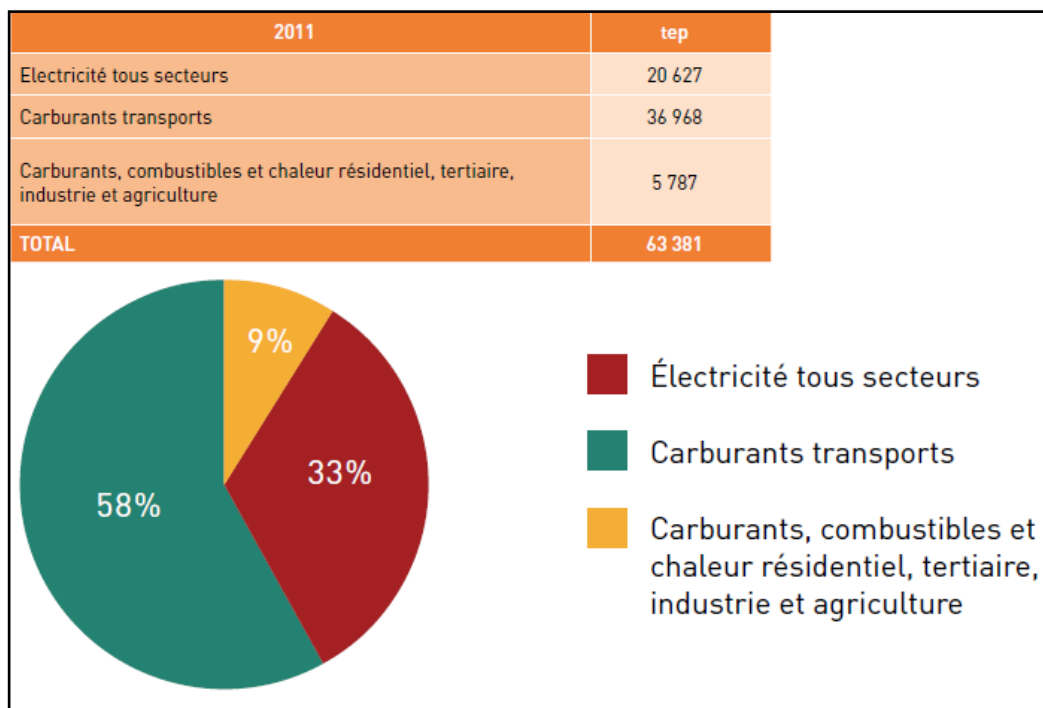


Figure 1.20 : Répartition des parts des consommations finales d'énergie en 2011
 Source : BEM 2011

Lorsque nous faisons un focus au niveau de la consommation électrique, nous obtenons un classement de cette consommation selon le type de client comme illustré au niveau de la Figure 1.21. Sur cette figure, de 2002 à 2008, EDM (qui est le seul producteur et fournisseur d'électricité sur Mayotte) utilisait un système de comptabilité propre afin de mesurer l'intensité de la consommation. Depuis 2009, EDM utilise un autre système de comptabilité qui ressemble plus à la présentation des autres départements outre-mer français. Parmi les nouveautés, nous observons notamment une distinction entre la consommation des particuliers et des professionnels ainsi que des collectivités locales.

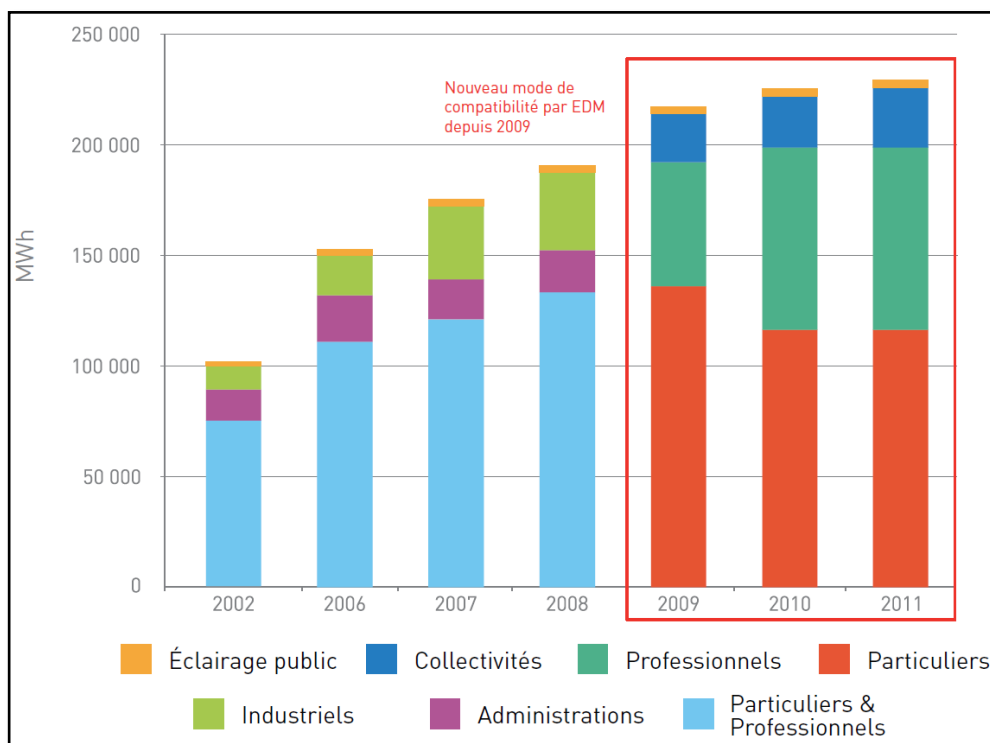


Figure 1.21 : Évolution des consommations électriques à Mayotte de 2002 à 2011 [MWh]
Source : BEM 2011

D'après cette figure, nous remarquons, une chute de la consommation électrique du secteur particulier à Mayotte entre 2009 et 2010 au contraire des autres secteurs d'activité. Nous constatons qu'en ayant dissocié les particuliers et les professionnels, il a pu être mis en évidence le poids réel de la consommation des particuliers et des professionnels afin de mieux lutter contre le gaspillage électrique et pouvoir réaliser des économies pour les réorientées sur d'autre secteur en souffrance également.

1.1.5.2 - Impacts environnementaux

D'après le BEM 2011, les impacts environnementaux, dus à l'utilisation des énergies fossiles, étaient de 295 778 [tCO₂ éq] répartis entre le transport, la production électrique et les secteurs résidentiel-tertiaire, industrie et agriculture. Le Tableau 1.10 permet de visualiser ces données.

Tableau 1.10 : Émissions des GES par secteur à Mayotte en 2011

Sous-thèmes	Indicateurs	Unité	2011
Émissions de GES	Émissions totales	tCO ₂ éq	295 778
	Part électricité	%	32% (164 096 tCO ₂ éq)
	Part transports	%	63% (115 847 tCO ₂ éq)
	Part des autres carburants	%	5% (15 835 tCO ₂ éq)
	Ratio CO ₂ /hab	tCO ₂ éq/hab	1,4
	Facteur d'émissions d'électricité	gCO ₂ /kWh	684

Source : BEM 2011

Nous notons que la production électrique et le transport totalisent à eux deux presque la totalité des émissions de GES à Mayotte.

1.2 - FORMES FONDAMENTALES ET CONVERSION DE L'ÉNERGIE

L'objectif dans ce paragraphe est de cerner plus précisément, dans une approche technologique, le terme énergie et de présenter l'ensemble des problématiques associées à ce terme afin de bien situer notre travail de recherche. Ce terme est évoqué dans beaucoup de contextes qui introduisent souvent des confusions sur ses différentes natures et formes. Il arrive même que nous confondons la source d'énergie et la nature de l'énergie. Comment devons-nous cerner par exemple l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie nucléaire, l'énergie biologique etc ..., comment les situer par rapport à la notion de source d'énergie? Comment les caractériser?

1.2.1 - Les différentes formes fondamentales de l'énergie

1.2.1.1 - Formes fondamentales de l'énergie

L'énergie est définie dans une approche technologique, comme le produit d'une grandeur physique en lien avec une action ou une sollicitation et d'une grandeur physique explicitant la réponse à cette action ou sollicitation. Par exemple :

- Autour des actions mécaniques nous avons par exemple des forces : \mathbf{F} , des moments : \mathbf{M} , des contraintes : $\boldsymbol{\sigma}$ qui sollicitent un objet d'étude. Nous pouvons expliciter respectivement des déplacements : $d\mathbf{l}$, des rotations : $d\boldsymbol{\theta}$ et des déformations : $d\boldsymbol{\varepsilon}$ qui constituent les réponses à ces actions. L'énergie mécanique aussi appelée le travail se définit comme telle :

$$dW = \mathbf{F}.d\mathbf{l} \quad \text{ou} \quad \mathbf{M}.d\boldsymbol{\theta} \quad \text{ou} \quad \boldsymbol{\sigma}.d\boldsymbol{\varepsilon}$$

Cette énergie sera définie comme une énergie fondamentale.

- L'Énergie Électrique se déclinera en termes de puissance et sera aussi définie comme une énergie fondamentale résultant du produit d'une sollicitation (Potentiel électrique ou Tension) et de la réponse à la sollicitation (Intensité électrique).
- L'Énergie Thermique est ainsi le produit d'une température par une variation d'entropie.
- L'Énergie Chimique est le produit d'un potentiel chimique par une variation de quantité de moles.

Il existe deux autres formes fondamentales qui se définissent dans une approche physique l'Énergie Rayonnante et l'Énergie Nucléaire. La première entre dans le cadre classique d'une forme fondamentale de l'énergie, la seconde plus difficilement.

En effet une autre caractéristique des formes fondamentales d'énergie est la possibilité de conversion entre elles en lien avec des lois universelles qui leurs sont associées. Ces lois sont clairement explicitées pour les 5 premières formes d'énergie. Elles ne le sont pas pour la dernière forme fondamentale.

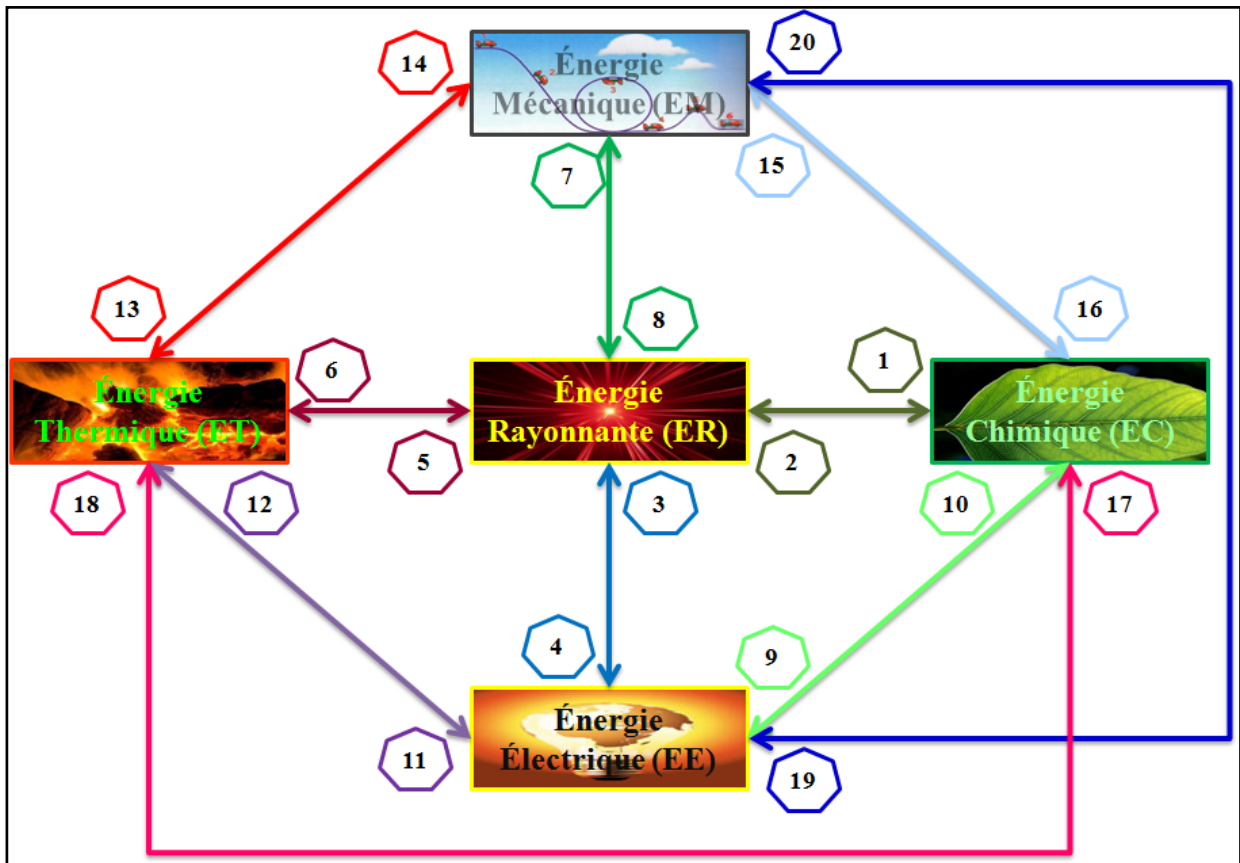


Figure 1.22 : Les formes d'énergie
 Source : Cours énergétique M2, JCG

L'énergie s'exprime en joules (J) dans le système international d'unité. D'autres unités de mesure sont utilisées selon les contextes et formes d'énergie. Ces unités sont présentées sur le Tableau 1.11 ci-dessous.

Tableau 1.11 : Unité d'énergie

J = Joule
cal = calorie
kWh = kilowattheure
Btu = British thermal unit
Tep = tonne équivalent pétrole
Tec = tonne équivalent charbon

1.2.1.2 - Lois et dispositifs de conversion de l'énergie

Les énergies fondamentales peuvent se convertir systématiquement entre elles à partir de lois de conversions, à priori universelles. Ces lois donnent lieu à des dispositifs de conversion qui peuvent être multiples selon les approches technologiques considérées.

Tableau 1.12 : Processus de conversion d'une forme d'énergie à une autre

	Conversion	Dispositif	Lois
1	ER => EC	Plante	photosynthèse
2	EC => ER	Luciole	Luminescence
3	EE => ER	Antenne émettrice Four micro-ondes	Loi de Lenz et Faraday
4	ER => EE	Antenne réceptrice Photovoltaïque	Loi de Lenz et Faraday L'effet photovoltaïque SC
5	ER => ET	Capteur solaire thermique	Loi de Stefan Boltzmann
6	ET => ER	Lampe à incandescence	Loi de Stefan Boltzmann
7	ER => EM	Voile solaire	Loi pression photonique
8	EM => ER	Baguette luminescente	Propriété de semi-conducteur
9	EC=> EE	Piles combustibles Accumulateurs	Réaction d'Oxydo-Réduction
10	EE => EC	Accumulateurs	Réaction d'Oxydo-Réduction Électrolyse
11	ET => EE	Thermocouples Plaque à induction	L'effet Seebeck : effet thermoélectrique des semi- conducteurs
12	EE => ET	La résistance électrique Four	Loi de Joule
13	ET => EM	Turbines Moteur thermiques	Loi de Joule
14	EM => ET	Freinage de roue	Loi de Frottement, choc
15	EM => EC	Réacteur chimique	Réaction piezzo chimique
16	EC => EM	Dynamite Moteur thermique	Réaction exothermique
17	EC => ET	Réchaud, four	Réaction chimique exothermique
18	ET => EC	Dispositif de thermolyse	Réaction endothermique
19	EM => EE	Dynamo	Loi d'Ampère
20	EE => EM	Moteur électrique Haut-parleur	Loi d'Ampère

Nous présentons sur le Tableau 1.12 quelques illustrations de ces lois et dispositifs de conversion.

Entre 2 formes fondamentales d'énergie, il peut exister plusieurs lois de conversion possibles :

- Soit en raison de dualités existantes entre ces énergies, c'est le cas par exemple de l'énergie rayonnante.
- Soit en raison de formes multiples de l'énergie fondamentale (Énergie cinétique ou potentielle pour l'énergie mécanique, énergie électrostatique, magnétique, électrocinétique pour l'énergie électrique).

Notons également qu'une même loi peut permettre des conversions d'énergie dans les 2 sens. C'est le cas par exemple de la loi de Lenz et Faraday.

Notons que si nous convertissons des formes secondaires d'une énergie fondamentale, par exemple énergie potentielle en énergie cinétique pour l'énergie mécanique, ou énergie électrocinétique en énergie électromagnétique pour l'énergie électrique nous dénommerons ce processus transformation. Ces processus reposent sur les mêmes bases conceptuelles au niveau des lois de transformation et des dispositifs de transformation.

1.2.1.2.1 - Chaînes énergétiques

Une chaîne énergétique peut se considérer dans le cadre de processus naturel ou artificiel. Elle intègre des processus de transformation et de conversion. Elle met en jeu plusieurs lois et donc plusieurs dispositifs de conversion pour, à partir d'une énergie initiale atteindre, une forme d'énergie utilisable dans un contexte donné comme illustré sur la Figure 1.23.

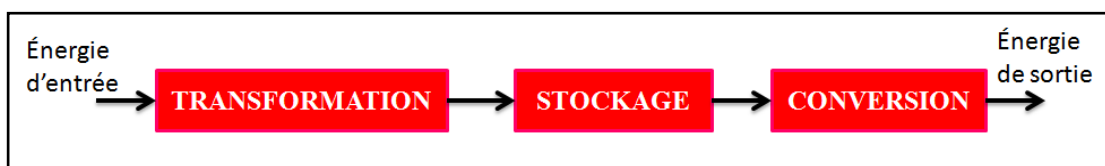


Figure 1.23 : Chaîne d'énergie
Source : maxicours

Dans le cas où nous nous situons dans une approche plus large des processus de conversion, les entités que nous observons ne pourront pas être représentées par des chaînes énergétiques. Nous nous placerons dans le cadre de systèmes énergétiques comprenant des phases d'extraction, de production, de transport, de distribution, de consommation, et d'intégration. Nous aurons donc une approche système pour décrire ces entités comme illustrée sur la Figure 1.24. Nous les décrirons plus en détail plus loin dans ce chapitre.

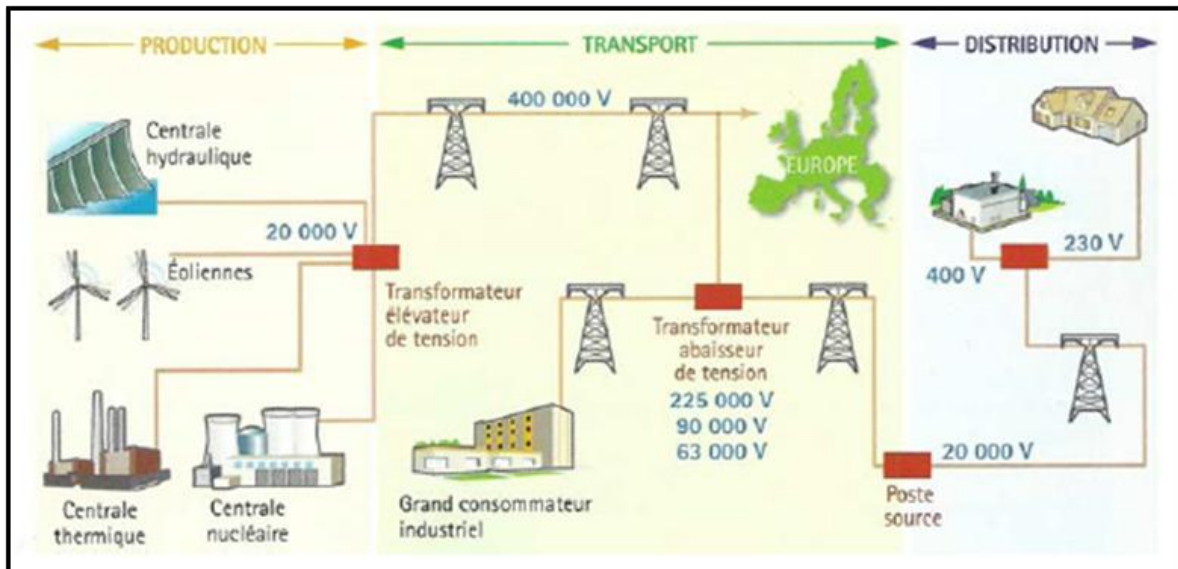


Figure 1.24 : Exemple d'approche système
 Source : Réseau de Transport d'Électricité

1.2.1.2.2 - Sources d'énergie

Une source énergétique est une entité très variable qui peut s'appréhender dans plusieurs contextes. Nous pouvons caractériser les sources d'énergie suivant plusieurs approches. Nous présentons ci-après les 3 principales approches :

- Sources naturelles et artificielles
 - Les sources énergétiques naturelles sont le siège de multiples transformations (dans une même forme fondamentale) ou de conversion entre deux formes fondamentales. Les processus sont indépendants de toute intervention artificielle.
 - Les sources énergétiques artificielles font intervenir des processus technologiques très divers (systèmes industriels, agriculture, aménagement de cours d'eau, éolienne, etc.). Le plus souvent elle est associée à un dispositif de conversion qui permet un stockage, un transport ou une utilisation facilitée.

Les sources d'énergie artificielles tendent à mettre à disposition une source d'énergie directement utilisable.

- Sources renouvelables et non renouvelables
 - Les sources d'énergie non renouvelables sont en lien avec les énergies fossiles (gaz charbon, pétrole, uranium) qui sont des sources naturelles d'énergie qui ont été stockées sur un long terme.
 - Les sources d'énergie renouvelables représentent l'immense majorité des ressources énergétique. Ces sources sont en lien avec des processus naturels, qui ne sont stockées que sur de très courts termes.
- Sources primaire et sources secondaires

- Les sources d'énergie absolument primaires sont en nombres très limités.
 - Le soleil est une source d'énergie rayonnante et mécanique
 - La lune est une source d'énergie mécanique et dans une très moindre mesure rayonnante
 - La terre est source d'énergie mécanique et rayonnante
 - Les matériaux déformables élastiquement
 - Les matériaux radioactifs
- Les sources d'énergie secondaires sont toutes issues de ces sources primaires. Il existe plusieurs étages d'observation autour de ces énergies selon leur niveau séquentiel de production et leur accessibilité.

Plusieurs autres approches peuvent être considérées selon par exemple leur possibilité de stockage, de transport, les niveaux technologiques de production et d'accessibilité, leurs coûts.

La Figure 1.25 ci-dessous, nous donne une représentation simplifiée des sources d'énergie que nous pouvons identifier à différents niveaux d'observation.

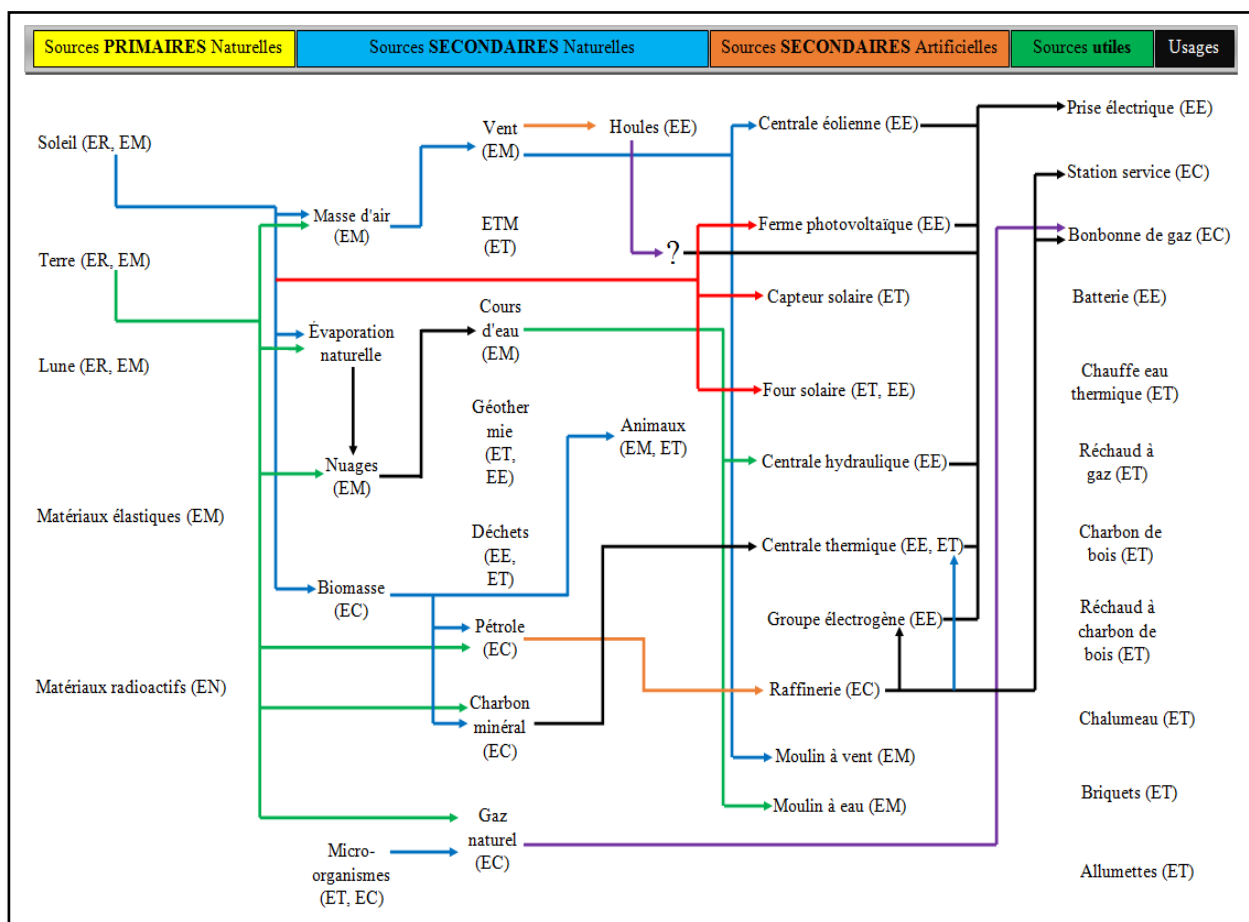


Figure 1.25 : Représentation simplifiée de différentes sources d'énergie
 Source : cours énergétique M2 PBE, JCG

1.2.1.2.3 - Système de production énergétique

Un système de production énergétique correspond à un système qui avec des processus divers et variés va engendrer une production d'énergie sous différentes formes.

En ce qui concerne par exemple l'électricité, sa production provient soit des ressources fossiles (fuel, uranium, charbon...) ou soit des ressources renouvelables (éolien, PV, bagasse...).

La description de tels systèmes relève du Génie des Procédés car il rassemble des connaissances et savoir-faire pluridisciplinaire afin de permettre la transformation industrielle des matières premières naturelles ou synthétiques en des produits élaborés par une succession de procédure. Dans le cas de systèmes simples leur modélisation repose sur des modèles physiques bien cernés conduisant à des représentations dans une approche cartésienne. Dans certain cas de synoptiques plus complexes nous devons avoir recours à une approche systémique pour les décrire. Il existe des outils performants pour bien les cerner.



Figure 1.26 : Exemple de système de production énergétique

1.2.1.2.4 - Système de consommation énergétique

Les systèmes de consommation énergétique sont très variables selon les secteurs d'activités que nous devons considérer dans une approche pointue autour d'un espace bâti. Il varie également selon les typologies d'énergie en jeu (électrique, essence, charbon, vapeur, ...).

Il faudra donc clairement définir un contexte de consommation énergétique. Il devra être analysé à différentes échelles d'observation (Bâtiments, Espace Fonctionnelle ou phase opératoire, Poste de Consommation et composants). Il intervient dans cette analyse beaucoup de paramètres : techniques, économique, sociologiques, etc. Ces systèmes apparaissent donc comme des systèmes multi-complexes dont la description et l'analyse doivent être conduites en conséquence. Un système multi-complexe est grand ensemble de plusieurs grand nombre d'entités en interaction qui empêchent l'observateur de prévoir sa rétroaction, son comportement ou évolution par le calcul. Pour pouvoir effectuer, une prévision à l'aide de calcul, l'observateur doit dissocier le système en plusieurs sous-systèmes.



Figure 1.27 : Exemple de système de consommation énergétique

1.2.1.2.5 - Système de distribution énergétique

Un système de distribution fait intervenir des problématiques très variables selon le type d'énergie et le contexte de distribution. Il s'agit de transformer l'énergie disponible en une énergie directement utilisable par le système de consommation. Il faudra ajuster en permanence la production et disponibilité de l'énergie aux besoins. Il s'agira également de gérer l'énergie disponible notamment s'il faudra associer plusieurs sources d'énergie. De tels systèmes se décrivent et s'analysent autour de données de production et de consommation dans une approche le plus souvent prédictive. Le pilotage de tels systèmes peut s'avérer très compliqué. Il faudra faire appel le plus souvent à des algorithmes mathématiques élaborés.



Figure 1.28 : Exemple de système de distribution énergétique

1.2.1.2.6 - Système de transport énergétique

Autour des systèmes de transport doivent être considérées le plus souvent des logistiques de gestion associées à des choix technologiques autour notamment de problématiques de sécurité et d'ordre économique. La question de performance de tels systèmes est importante. Nous n'aborderons pas dans cette thèse ces aspects.



Figure 1.29 : Système de transport énergétique

1.2.1.2.7 - Système de stockage énergétique

Les différentes formes énergétiques ont des propriétés de stockage très variables. Les capacités de stockage dans un système énergétique permettent une gestion plus ou moins élaborée de tels systèmes. Dans nos approches, ces systèmes seront considérés autour de leurs paramètres de capacité et de fonctionnement.



Figure 1.30 : Système de stockage énergétique

1.3 - CADRE METHODOLOGIQUE

1.3.1 - Bases conceptuelles des outils de description et d'analyse

La mise en œuvre des outils de description et d'analyse des systèmes énergétiques que nous serons appelés à développer dans le cadre de ce travail de recherche s'appuie sur 3 éléments conceptuels (cf Figure 1.31) :

- La référence à un cadre normatif en lien avec l'Analyse de Cycle de Vie;
- L'approche systémique qui nous permettra de décrire les environnements d'étude et de conduire nos analyses;
- L'approche typologique qui nous permettra de cerner et de simplifier nos environnements d'étude.

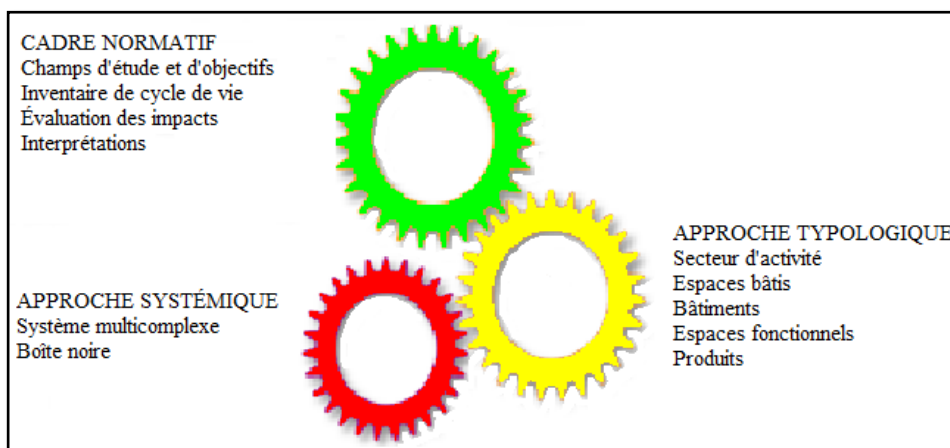


Figure 1.31 : Description des éléments conceptuels de notre étude

1.1.3.1 - L'approche systémique

La description d'un système énergétique et de son environnement, d'un bâtiment, d'un milieu urbain, plus généralement d'un système physique faisant intervenir un nombre important de phénomènes en relation avec des actions mécaniques, thermiques, électriques, chimiques, radiatives se réfèrent difficilement aux démarches classiques de modélisation associées à l'observation d'objets d'étude caractérisés par un nombre réduit de phénomènes. Les systèmes physiques qui nous intéressent ici sont associés à un nombre élevé de paramètres de description pour expliciter leur état en relation avec des phénomènes de types souvent très différents explicitant des transformations variées.

Ces systèmes se définissent comme des systèmes complexes, composées d'éléments en interaction multiples. Dans le cas d'études des systèmes physiques dénommés complexes, il est intéressant d'explorer une approche qui se révèle complémentaire à la démarche cartésienne. Cette approche s'appuie sur l'analyse systémique. Ses concepts ont permis de mettre en œuvre des démarches et des outils intéressants dans des disciplines qui identifient leurs objets d'étude comme des systèmes complexes, notamment en sciences humaines et sciences économiques, mais aussi en sciences naturelles, et en technologie. Tout un ensemble de paradigmes, de méthodologies d'analyse ont été explorés autour de cette nouvelle démarche scientifique. Nous proposons ici de resituer les préceptes et concepts de l'analyse systémique dans le cadre des développements spécifiques que nous serons amenés à considérer dans notre étude.

Aux quatre préceptes de l'approche cartésienne, nous substituerons respectivement les quatre préceptes de l'approche systémique.

* Quatre préceptes de l'**approche cartésienne**

- Le précepte de causalité
- Le précepte d'évidence
- Le précepte réductionniste
- Le précepte d'exhaustivité

* Quatre préceptes de l'**approche systémique**

- Le précepte de téléologie
- Le précepte de pertinence
- Le précepte de globalité
- Le précepte d'agrégation

Les différents éléments nous permettant d'explicitier ces différentes approches nous sont présentés au niveau de la Figure 1.32.

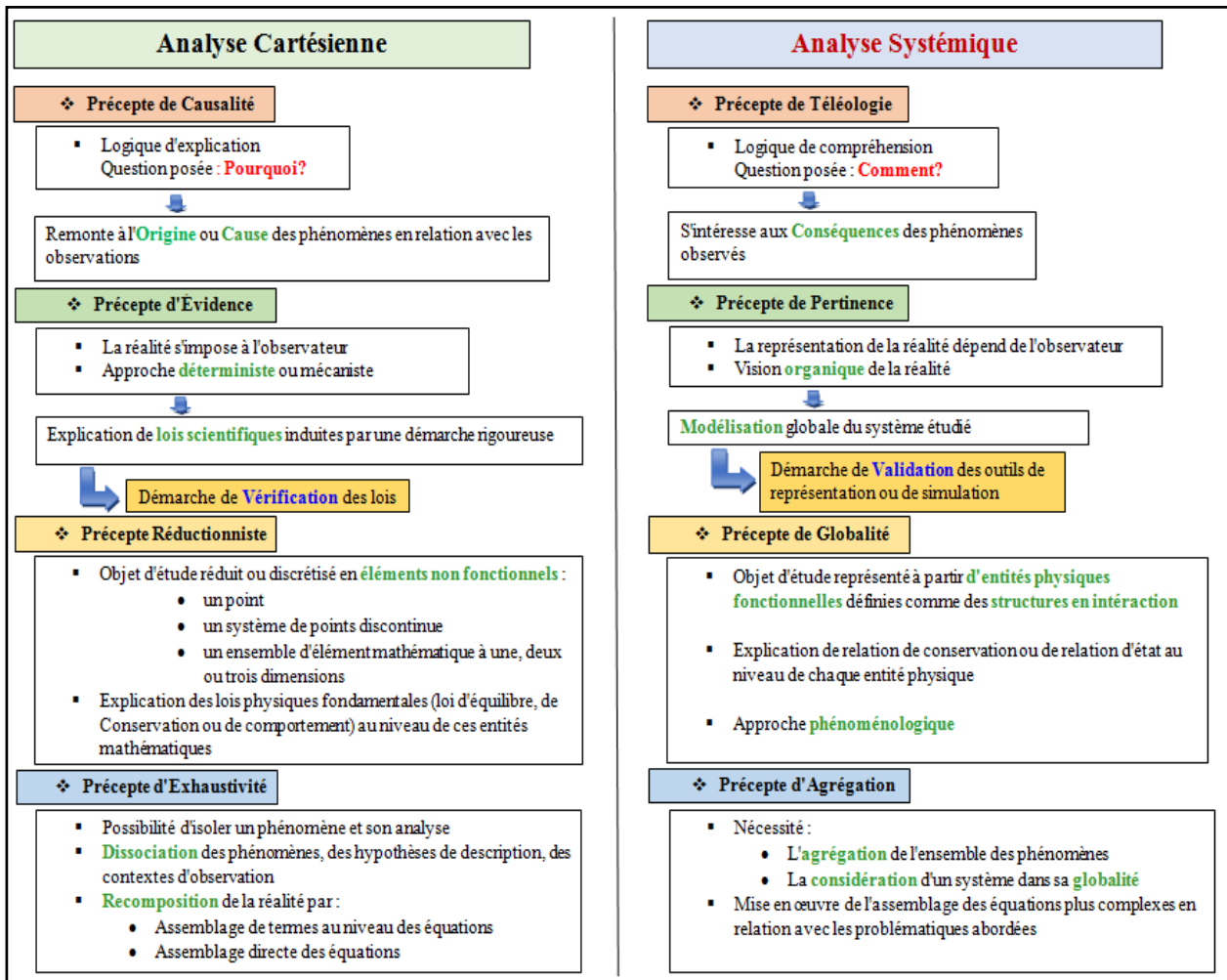


Figure 1.32 : Présentation des approches cartésienne vs systémique
Source : Cours énergétique M2 PBE, JCG

Au-delà de ces préceptes nous permettant de préciser un cadre conceptuel de description, nous devons mettre en œuvre des outils pour réaliser des descriptions ou modélisation des systèmes observés et les analyser. Nous nous référons alors à ces concepts qui nous permettront d'effectuer ces réalisations. Ces concepts nous donneront des repères pratiques pour mettre en œuvre de véritables outils de représentation et d'analyse, utiles à une description rigoureuse d'un système complexe. Nous retiendrons quatre concepts fondamentaux : l'interaction, la totalité, l'organisation, la complexité (cf. Figure 1.33).

En nous appuyant sur les préceptes et concepts de l'analyse systémique, nous sommes amenés à mettre en œuvre des démarches et méthodologies particulières pour conduire l'étude des systèmes complexes dans les étapes de modélisation, d'expérimentation et d'analyse des paramètres de fonctionnement.

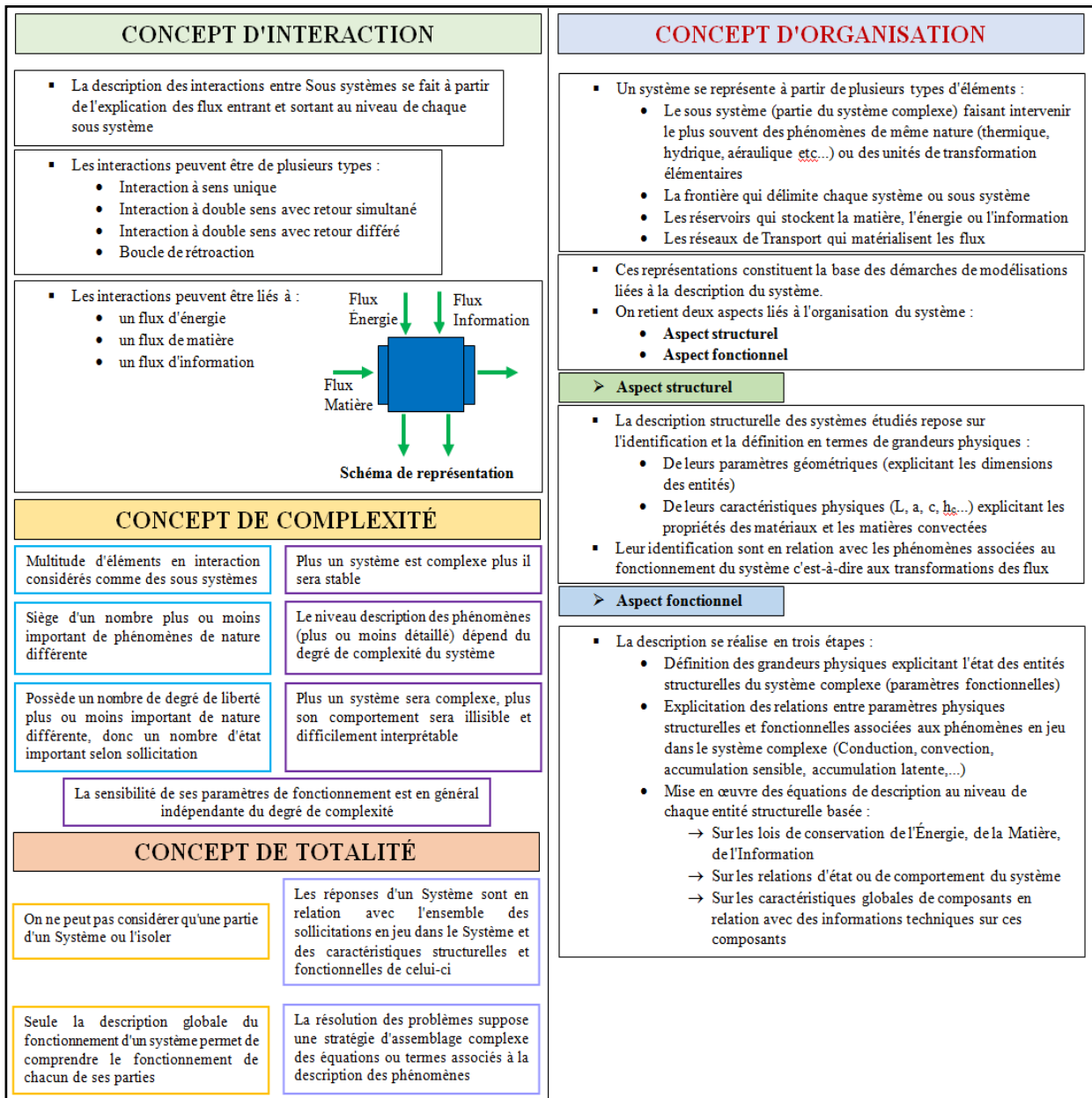


Figure 1.33 : Les quatre concepts fondamentaux à l'étude des systèmes complexes
 Source : Cours énergétique M2 PBE, JCG

Dans le cas de systèmes complexes nous pourrons alors conduire une modélisation des systèmes à partir de modèles décrivant chaque phénomène en interaction et obtenir une représentation virtuelle de ces systèmes[28]. Les simulations que nous pourrons alors mettre en œuvre pourront faire l'objet de multiples analyses permettant de comprendre le fonctionnement du système dans tous ses aspects. De telles situations nous intéressent dans notre étude, autour par exemple de systèmes de production d'énergie et de leur intégration dans leur environnement.

Si nous devons observer des systèmes de consommation d'énergie dans leur ensemble ou des problématiques liés à la gestion de la distribution de l'énergie, nous devons considérer une approche multi complexe faisant intervenir des phénomènes encore plus nombreux et quelconques. Leur description n'est alors pas possible à partir de modèles de description physique. Dans le cas de systèmes multi complexes nous sommes donc amenés à considérer ces entités comme des boîtes noires

d'où nous observons des paramètres de fonctionnement en d'entrée et de sortie de leur frontière. Il s'agira alors d'intégrer ces informations et de pouvoir les analyser à différentes échelles d'observation.

Tout au long de notre travail, l'approche systémique se trouvera au cœur de notre démarche pour assurer une cohérence dans les analyses techniques, environnementales et économiques que nous serons amenés à développer.

1.1.3.2 - L'approche typologique

Les systèmes et environnements que nous serons amenés à décrire ont une multitude de configurations. Ils fonctionnent dans des contextes très divers. Leur description et leur analyse ne pourront être conduite de manière rigoureuse, claire et simplifiée que si nous avons une approche typologique qui nous permet de situer précisément leur configuration et contexte de fonctionnement. Nous appliquerons cette approche au niveau de la description des systèmes de consommation et aussi des systèmes de production et des systèmes de distribution.

Ces différentes situations ont été exposées dans la thèse de Néria RAKOTONARIVO[4].

Nous présentons ci-après de manière synthétique les principaux contextes typologiques :

- Description des secteurs d'activité afin de situer les caractéristiques de fonctionnement des systèmes de consommation;
- Description des flux d'énergie selon leurs contextes d'usages;
- Description des postes de consommation énergétique;
- Description des Espaces Fonctionnels observés;
- Description des configurations structurelles des bâtiments observés;
- Description des configurations fonctionnelles des bâtiments observés;
- Description spatiale des systèmes;
- Description des journées types de consommation énergétique.

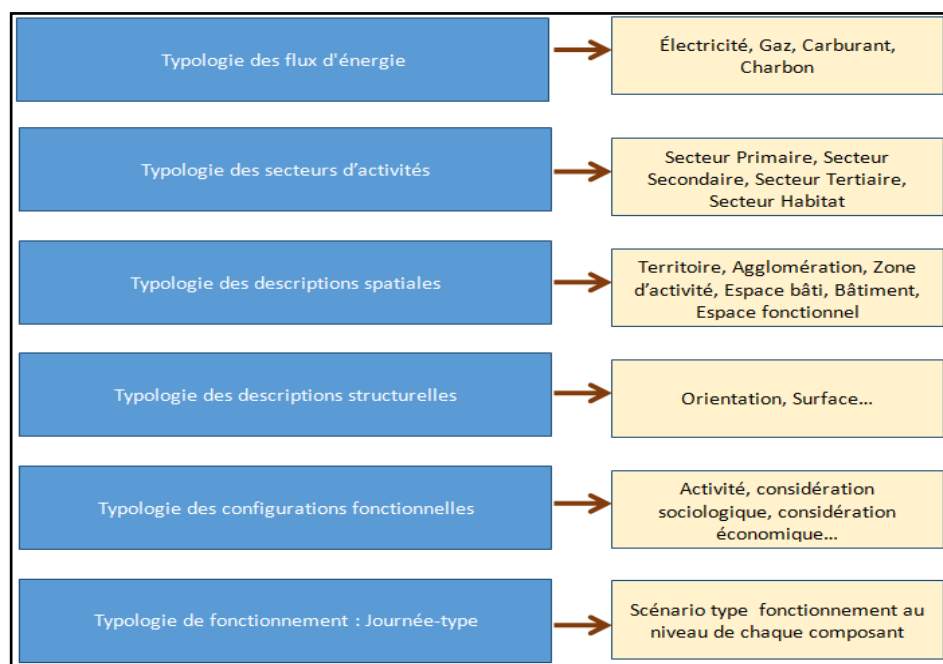


Figure 1.34 : Présentation de notre approche typologique
Source : Cours énergétique M2 PBE, JCG

Pour chacun des contextes typologiques il s'agira d'évaluer les situations observées à partir de paramètres adaptés. Nous pourrions développer ces situations dans d'autres contextes à partir de loi de corrélation ou de duplication afin d'intégrer toutes les configurations et toutes les situations qui nous intéressent dans les études que nous avons à conduire.

1.1.3.3 - Le cadre normatif

Les systèmes que nous serons appelés à décrire et analyser ont des configurations multiples. Les problématiques que nous devons aborder sont également très variées. Il nous faut un cadre de description et d'analyse normalisés pour pouvoir assurer une bonne lisibilité et cohérence de nos approches autour de la réalisation de nos outils de simulation. De manière plus ou moins explicite toutes les approches d'évaluation d'impacts environnementaux se réfèrent donc à un cadre normatif autour des normes ISO.

Ces normes constituent notamment un cadre de référence dans l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Ils nous permettent de cadrer les évaluations des facteurs d'impacts environnementaux pour tout flux de matières et tout flux d'énergie. Nous les considérerons également pour mettre en œuvre tous bilans d'impacts pour tout système que nous observerons dans cette thèse. Plus généralement, toute description de système dans sa configuration structurelle et fonctionnelle et leur analyse s'appuiera sur ce cadre normatif.

La Figure 1.35 résume les éléments essentiels que nous reprenons au niveau de ces normes.

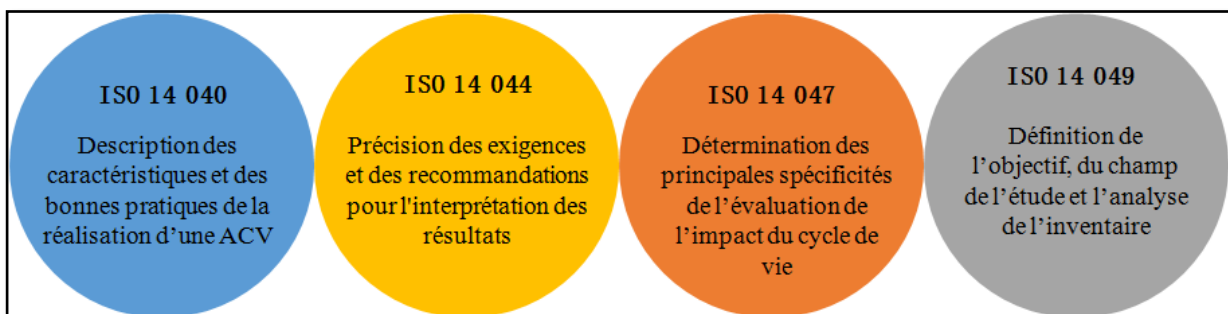


Figure 1.35 : Description des normes
Source : iso.org

Le respect de ces normes permet d'évaluer l'impact potentiel ainsi que la protection environnementale pour un produit ou un système, cela en considérant différentes étapes [29] comme indiqué sur la Figure 1.36.

La Figure 1.36 résume les éléments essentiels que nous reprenons au niveau de ces normes, c'est-à-dire de l'ACV.

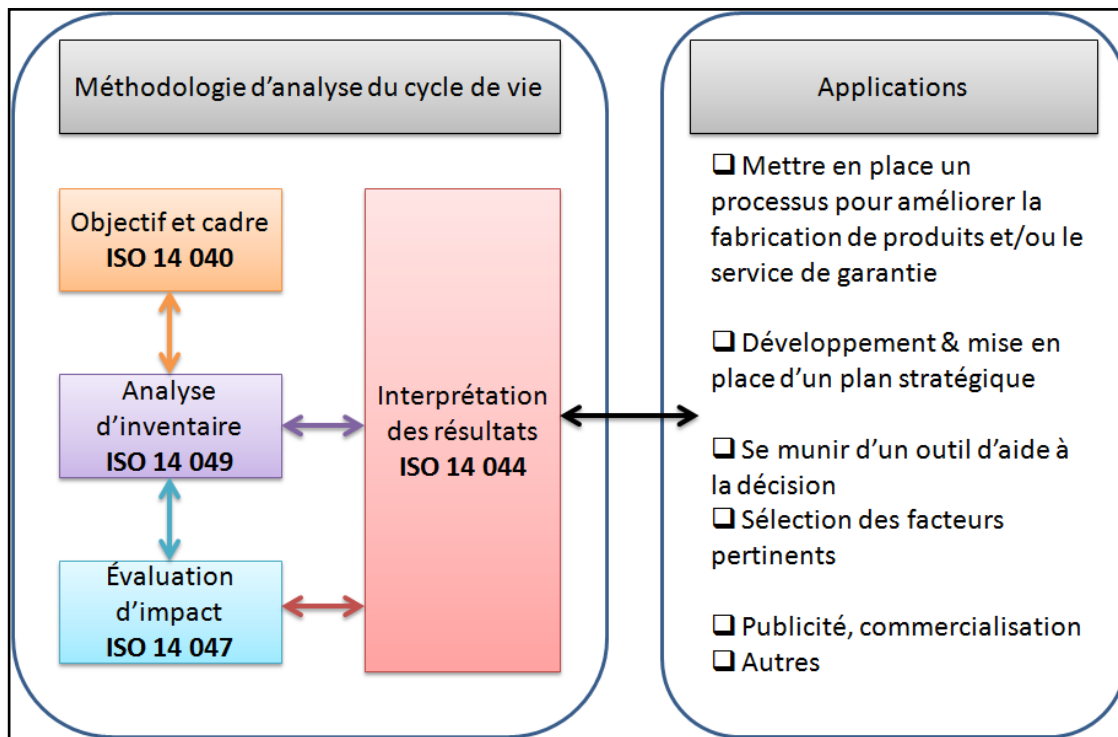


Figure 1.36 : Les différentes phases de l'ACV selon les normes ISO (pour une entreprise)

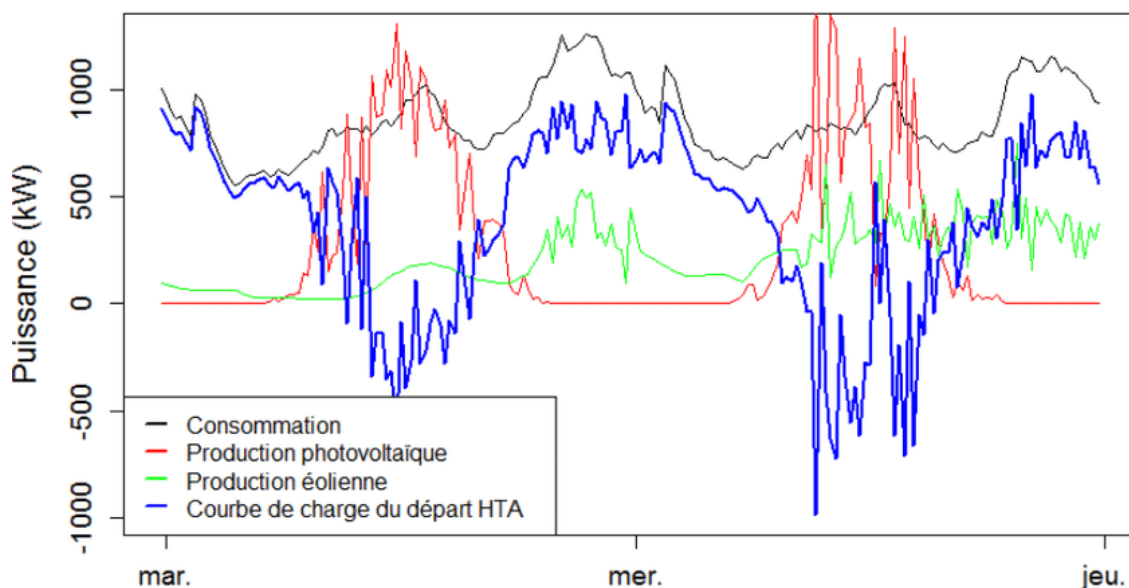
Source : Andreja Bosner et al.

Ces normes permettent notamment de définir les étapes de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Nous nous baserons sur ces différentes étapes pour les étendre à toute description de systèmes énergétiques, dans la suite de notre étude.

1.4 - Synthèse du CHAPITRE I

Dans ce premier chapitre, nous avons vu que l'énergie existe sous différentes formes et qu'avec des processus spécifiques, il est possible de le faire passer d'une forme à une autre forme. Dans le prochain chapitre, nous nous concentrerons exclusivement sur la forme d'énergie électrique notamment comment pouvoir estimer sa consommation au niveau d'un espace bâti.

2 - CHAPITRE II : CONCEPTION ET RÉALISATION DES OUTILS DE SIMULATION DE LA CONSOMMATION, PRODUCTION ET PILOTAGE ÉNERGÉTIQUES



«Peut-on s'approcher du mystère? Peut-on dialoguer avec le mystère? Tel est le sens de ma présente aventure : patrouiller aux confins de la connaissance pour appréhender et ressentir l'inséparabilité connaissance-ignorance-mystère» Edgar Morin

2.1 - CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA MISE EN ŒUVRE DES OUTILS

Ce travail de thèse s'inscrit à la suite des travaux de thèse réalisés au sein du laboratoire PIMENT, particulièrement de la thèse de RAKOTONARIVO Néria[4]. Cette thèse a porté sur la mise en œuvre d'une méthodologie ainsi que d'un Outil pour permettre l'évaluation et l'analyse de la consommation d'énergie électrique d'un espace bâti et du bilan carbone associé[30] [31]. Cette analyse a consisté à observer à différentes échelles de temps et d'espace les énergies consommées dans un espace bâti au niveau des postes de consommations, des espaces fonctionnels, des bâtiments, et des espaces bâtis, à l'échelle d'une journée type, puis de chaque mois et enfin de l'année

Le premier objectif de notre travail a porté sur l'évaluation de la consommation électrique dans un espace bâtis[32]. Il s'est articulé autour de 2 volets :

Un premier volet a consisté à apporter des développements complémentaires aux outils et démarches proposés dans la thèse de RAKOTONARIVO Néria en intégrant notamment d'autres approches typologiques autour des configurations structurelles et fonctionnelles des espaces bâtis. Il a consisté en outre à mieux se positionner dans l'approche normative, en développant les outils de simulation à partir de pages génériques.

Dans un second volet de ce premier objectif, nous avons été amenés à développer un outil de simulation de la consommation horaire d'un espace bâti me permettant de créer des fichiers de consommation horaire sur chaque jour de l'année pour un espace bâti quelconque. Ce fichier de consommation serait mis en parallèle avec un fichier de production d'EnR. À partir desquels, nous devons assurer la gestion de la distribution d'énergie sur un territoire donné[33] [34] [35].

Le deuxième objectif de notre travail a consisté à mettre en œuvre un outil d'évaluation d'une production d'EnR (photovoltaïque et éolienne) afin de pouvoir disposer d'un fichier horaire de production énergétique basé sur les EnR pour un territoire ou un site donné sur un format adapté au fichier de consommation produit dans le premier objectif défini plus haut[36] [37].

Le troisième objectif a consisté à mettre en œuvre un outil de pilotage de distribution de l'énergie associé à un dispositif de stockage d'énergie électrique autour de plusieurs scénarios de distribution permettant de lisser les pics de consommation à l'échelle de la journée grâce aux productions d'EnR[38] [39].

2.1.1 - Démarches conceptuelles autour de la consommation énergétique

2.1.1.1 - Approches systémiques et typologiques

La thèse de Néria RAKOTONARIVO a mis en évidence, que le fonctionnement énergétique d'un espace bâti fait intervenir un grand nombre de phénomènes liés à diverses actions à différentes échelles temporelles et spatiales. Un espace bâti est donc considéré comme un système complexe. Sa modélisation repose donc sur une démarche systémique et typologique afin d'étudier les phénomènes

dans leur ensemble. Les différents systèmes et sous-systèmes définis autour d'un espace bâti (en amont et en aval) peuvent être représentés à partir des Figure 2.1 et Figure 2.2.

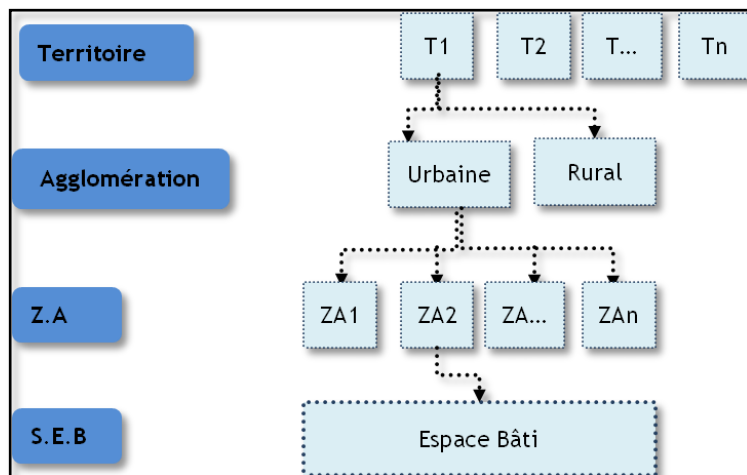


Figure 2.1 : Description systémique en amont d'un espace bâti
 Source : Thèse de Rakotonarivo N., 2013

La description systémique en amont d'un espace bâti permet de disposer des informations plus détaillées de l'espace bâti étudié concernant :

- Le territoire sur lequel le système est localisé;
- L'agglomération à laquelle appartient le système;
- La zone d'activité du système (Z.A);
- Le système d'espace bâti dans lequel le système se situe (S.E.B).

Nos analyses porteront sur un espace bâti, une zone d'activité ou un territoire.

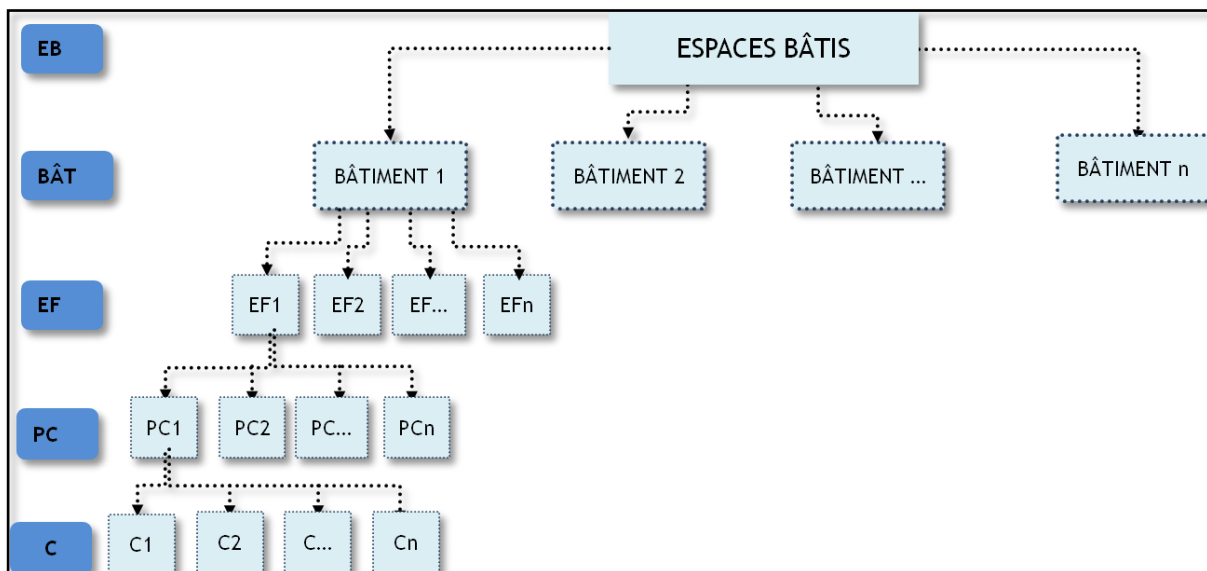


Figure 2.2 : Description systémique en aval d'un espace bâti
 Source : Thèse de Rakotonarivo N., 2013

La description systémique en aval d'un espace bâti se concentre autour des éléments suivants :

- L'espace bâti (EB);
- Les bâtiments (BÂT);

- Les espaces fonctionnels (EF);
- Les postes de consommation (PC);
- Les composants (C).

En parallèle, de cette démarche systémique, on effectue aussi une démarche typologique afin de disposer d'une nomenclature permettant de bien classifier les différents niveaux des éléments constitutifs d'un espace bâti. L'approche typologique s'applique à chaque sous-système explicité dans et autour d'un espace bâti observé.

Pour rappel, l'approche typologique prend en compte des typologies de situation ou des configurations spatiales et fonctionnelles et des typologies de situation comme indiqué notamment au niveau de la Figure 2.3.

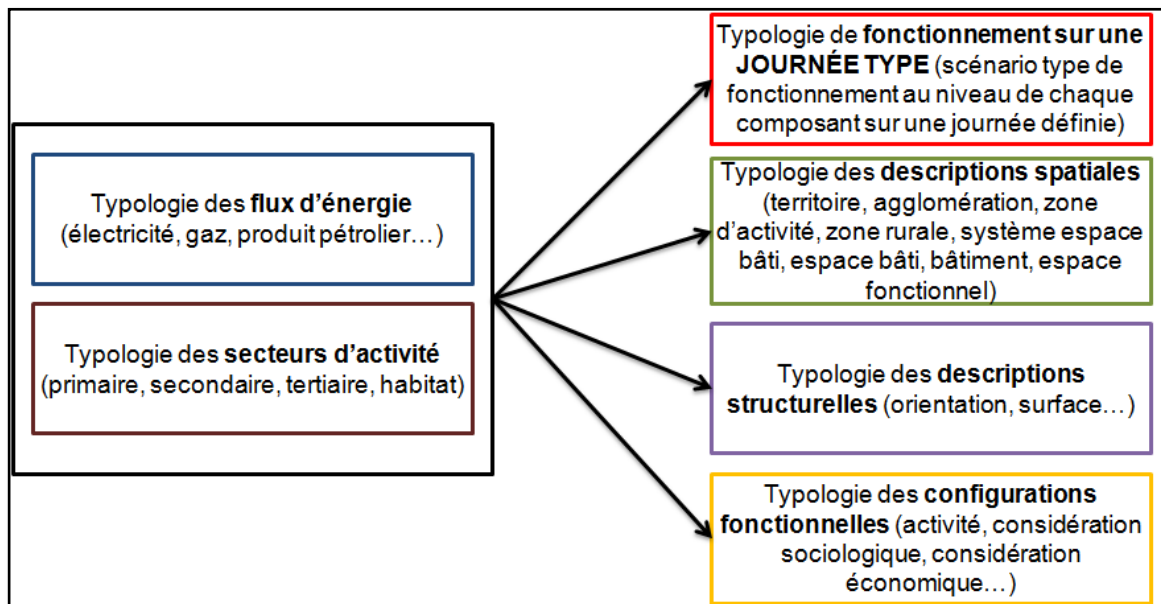


Figure 2.3 : Approche typologique
 Source : Thèse de Rakotonarivo N., 2013

2.1.1.2 - Les postes de consommation de l'énergie électrique

Dans notre cas d'étude, nous nous limiterons exclusivement à l'étude de l'énergie électrique. Cette énergie est la plus significative au niveau des espaces bâtis. Elle est complexe à étudier et à évaluer[40] [41], en ce sens qu'elle dépend de plusieurs facteurs[42] [43] [44]. Il existe par exemple des facteurs humaines (présence ou non de personne), naturelles (nuit) ou encore météorologique (pluie/soleil).

Afin de pouvoir l'évaluer, RAKOTONARIVO N. a défini des postes de consommation qui peuvent être classés selon deux catégories. La première catégorie regroupe l'ensemble des postes de consommation que nous considérerons comme transversaux, c'est-à-dire nous pouvons les retrouver dans la majorité des espaces bâtis. Elle en avait répertorié neuf exactement, auquel nous avons rajouté un dixième qui est le poste de consommation "SECURITE". Et la seconde catégorie regroupe l'ensemble des postes de consommation dits spécifiques. Ils sont très variables selon les secteurs d'activités en lien avec des actions ou besoins spécifiques[45] [46] [47].

Les postes de consommation transversaux identifiés sont au nombre de dix. Ils sont les suivants :

- Éclairage;
- Confort;
- Multimédia;
- Bureautique;
- Cuisson;
- Électroménager;
- Conservation - Stockage;
- Nettoyage;
- Maintenance - Bricolage;
- **Sécurité.**

Pour chaque poste de consommation, nous identifions des composants en lien avec la consommation électrique. C'est à ce niveau que se déroule l'acquisition des données qui permet par la suite d'évaluer la consommation énergétique de l'espace bâti par une démarche systémique. Ce faisant, nous partons de l'évaluation énergétique de chaque composant, pour aller à celui du poste de consommation auquel le ou les composant(s) se trouve(nt). Ensuite, nous remontons au niveau de l'espace fonctionnel dans lequel se trouve le ou les poste(s) de consommation. Puis, nous arrivons à l'échelle du bâtiment où se retrouve le ou les espace(s) fonctionnel(s). Enfin, nous terminons sur l'espace bâti dans lequel se situe le ou les espace(s) fonctionnel(s).

2.1.1.3 - Notion de journée type

Pour réaliser nos simulations à l'échelle de l'année, il serait très fastidieux d'observer les consommations pour chaque jour de l'année. Pour réaliser nos simulations nous observons les consommations sur une journée type de l'année que nous choisirons de manière pertinente. Par exemple en nous appuyant sur la courbe de charge électrique obtenue préalablement auprès des services concernés.

Pour chaque composante nous définirons un scénario d'utilisation ou facteur d'usage décrivant pour chaque heure de la journée un taux d'utilisation. Il sera alors aisé de calculer la consommation à l'échelle de ce composant, puis de l'ensemble des composants d'un poste de consommation. Leur intégration au niveau d'un espace fonctionnel comprenant des postes de consommation clairement identifiés permettra de réaliser une évaluation à cette échelle d'observation. Par un même processus nous pouvons alors remonter à l'échelle des bâtiments et des espaces bâtis, voire en amont des espaces bâtis. Ces calculs réalisés au niveau d'une journée type nous donnent déjà à cette échelle de temps une signature de consommation énergétique dans différentes configurations spatiales et fonctionnelles (par poste de consommations, par espace fonctionnelle, par bâtiment, ...).

Les calculs effectués pour une journée type sont récapitulés ci-après.

$$DUT_j[h] = \sum_{j=1}^{24} D_j [h]$$

$$C_j[kWh] = Q \times D_j[h] \times P[W]$$

$$CT_j[kWh] = \sum_{j=1}^{24} C_j[kWh]$$

$$C_M[kWh] = Q \times P \times CT_j \times D_M \times CP_M$$

$$C_A[kWh] = \sum_{M=1}^{12} C_M$$

$$C_{PC}[kWh] = \sum C_A$$

$$C_{EF}[kWh] = \sum C_{PC}$$

$$C_{Bât}[kWh] = \sum C_{EF}$$

$$C_{EB}[kWh] = \sum C_{Bât}$$

Avec :

DUT_j : La durée d'utilisation totale journalière par composant

D_j : La durée d'utilisation sur une heure de la journée par composant

C_j : Consommation horaire composant

Q : Nombre de composant présent

P : Puissance unitaire installée par composant

CT_j : Consommation totale journalière par composant

C_M : Consommation mensuelle par composant

D_M : Nombre de jour d'utilisation sur un mois par composant

CP_M : Coefficient mensuel de pondération par composant

C_A : Consommation annuelle composant

C_{PC} : Consommation poste de consommation

C_{EF} : Consommation espace fonctionnel

$C_{Bât}$: Consommation bâtiment

C_{EB} : Consommation espace bâti

2.1.1.4 - Calcul sur le mois de l'année en lien avec la journée type

Pour ce calcul de la consommation énergétique mensuel nous nous baserons sur un facteur d'usage mensuel. L'organigramme ci-après résume les étapes de calcul mis en œuvre.

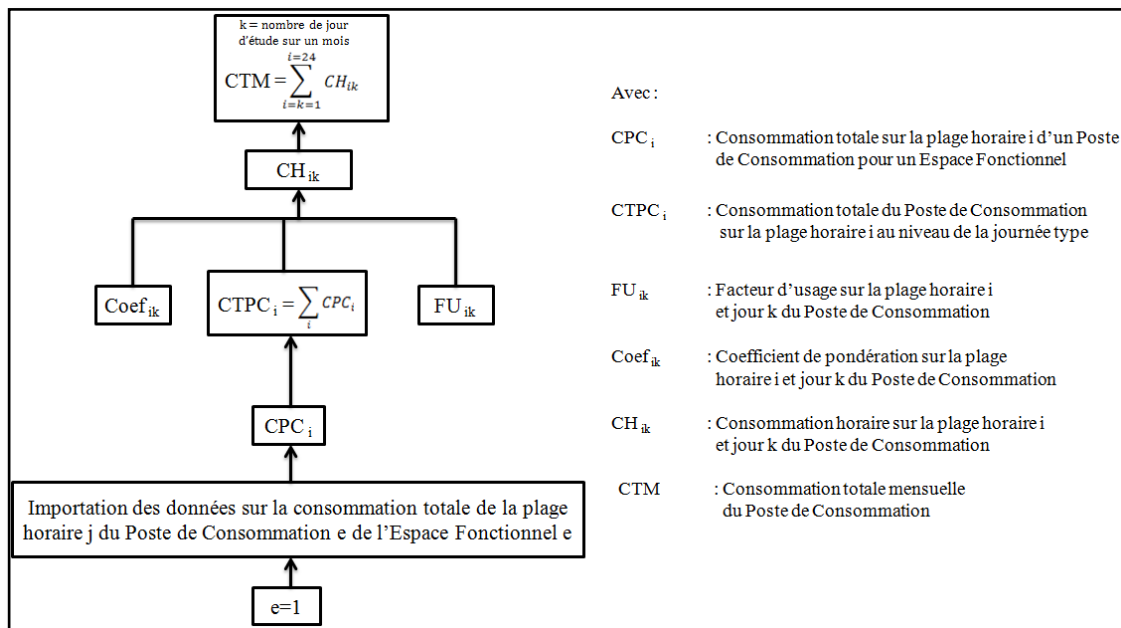


Figure 2.4 : Organigramme du calcul horaire sur le mois

2.1.1.5 - Calcul à l'échelle de l'année

Pour développer nos calculs à l'échelle de l'année, nous ferons intervenir un facteur de pondération qui peut être considéré à l'échelle d'un composant ou d'un poste de consommation selon les caractéristiques de consommation. Ce facteur pourrait aussi se considérer à l'échelle d'un espace fonctionnel, d'un bâtiment ou d'un espace bâtis selon les situations et les objectifs de simulation. Ces facteurs de pondération intègrent en premier lieu les variations dans l'année des ambiances climatiques qui affectent l'espace bâti. Ils intègrent également le type de poste de consommation et dans des cas particuliers selon le niveau d'analyse les configurations spatiales ou structurelles des espaces bâtis. Ces coefficients de pondération sont calculés à partir d'outils de simulation ou de bases de données appliquées à l'espace bâti observé.

Les calculs mis en œuvre sont résumés dans l'organigramme suivant

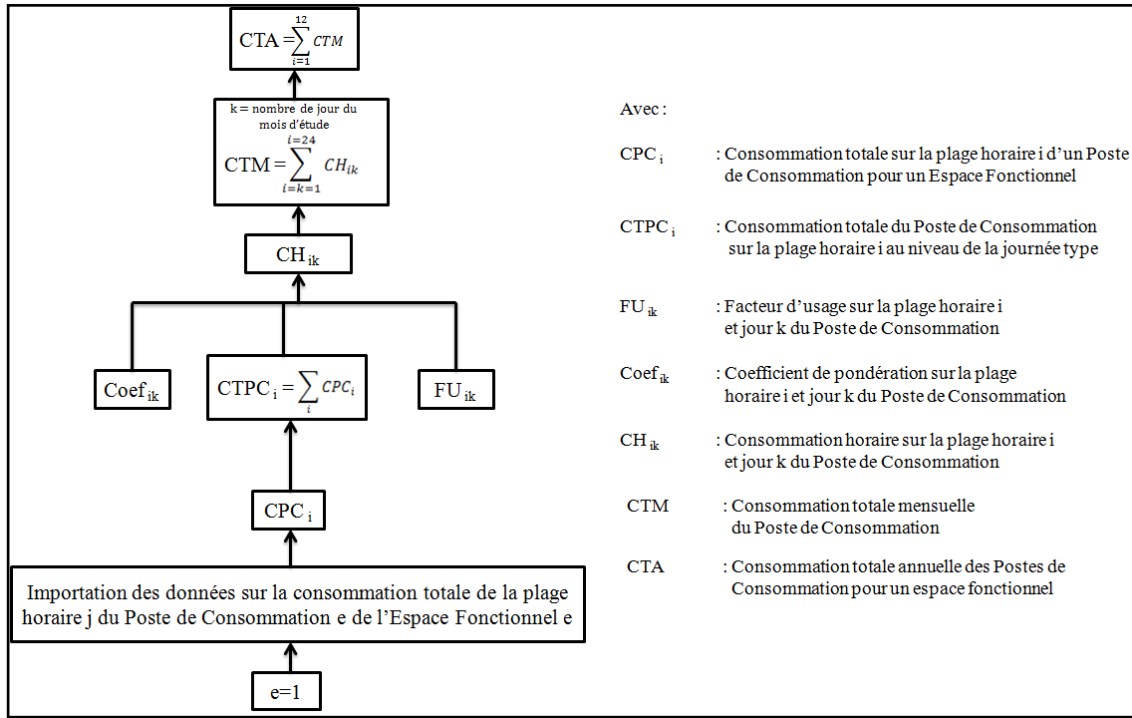


Figure 2.5 : Organigramme de calcul à l'échelle annuelle

En d'autres termes, pour étudier les flux énergétiques d'un espace bâti, nous nous basons sur trois étapes définies sur la Figure 2.6.

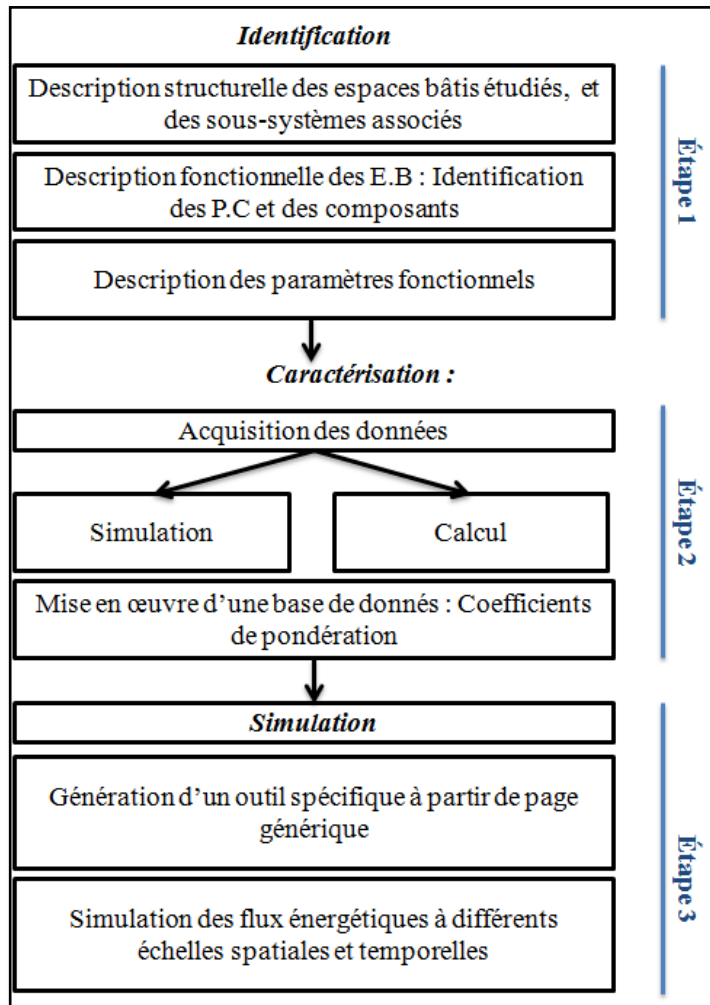


Figure 2.6 : Organigramme de la méthodologie d'étude de l'impact énergétique d'un espace bâti

2.1.1.6 - Calcul du bilan carbone

A partir des résultats de la consommation énergétique, nous pouvons déduire le bilan carbone au niveau d'un espace bâti, on s'appuiera sur les formules ci-dessous :

$$SE_C [g \text{ eq } CO_2] = \text{Facteur d'émission territoire d'étude} [g \text{ CO}_2/kWh] \times C_A [kWh]$$

$$SE_{PC} [g \text{ eq } CO_2] = \sum_i SE_{C_i}$$

$$SE_{EF} [g \text{ eq } CO_2] = \sum_i SE_{PC_i}$$

$$SE_{Bât} [g \text{ eq } CO_2] = \sum_i SE_{EF_i}$$

$$SE_{EB} [g \text{ eq } CO_2] = \sum_i SE_{Bât_i}$$

Avec :

SE_C : Signature énergétique au niveau d'un Composant

C_A : Consommation énergétique annuelle au niveau d'un composant

SE_{PC} : Signature énergétique au niveau d'un Poste de Consommation

SE_{EF} : Signature énergétique au niveau d'un Espace Fonctionnel

$SE_{Bât}$: Signature énergétique au niveau d'un Bâtiment

SE_{EB} : Signature énergétique au niveau d'un Espace Bâti

Nous nous appuyerons sur ces bases conceptuelles pour réaliser les outils d'analyse de la consommation énergétique dans un espace bâti et les outils de simulations dans le cadre de la réalisation de fichiers de consommations horaire de l'énergie électrique[48] [49] [50].

2.1.2 - Bases conceptuelles d'évaluation de la production énergétique d'origine EnR

2.1.2.1 - Objectifs de mise en œuvre

Les zones non interconnectées (ZNI) sont très vulnérables quant à leur production électrique[51]. En ce sens, le développement des énergies renouvelables est une nécessité afin d'acquérir un peu d'indépendance électrique, d'autant plus qu'en général il existe un fort taux d'ensoleillement dans ces zones qui associé à des actions énergétiques fortes peuvent amener à assurer une autonomie énergétiques de ces territoires[52].

La description et le choix des systèmes de production énergétique à partir des EnR se font en fonction des disponibilités des ressources renouvelables exploitables sur le site d'étude. Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à l'étude de la production éolienne et photovoltaïque. D'autres dispositifs peuvent être intégrés par la suite pour compléter les systèmes de production.

Il existe des outils de simulation permettant une aide à la conception au dimensionnement et au diagnostic de systèmes énergétique, notamment en lien avec les EnR (RETScreen, PV_{SYS}). Ces outils bien que performants ne répondent pas aux objectifs que nous nous sommes fixés dans notre travail de recherche. Nous nous appuyerons sur les modèles intégrés dans ces outils de simulation pour mettre en œuvre nos propres outils de simulation répondant notamment à la mise en œuvre d'un fichier horaire de production que nous pourrions interfacer avec un fichier horaire de consommation et un outil de pilotage de la distribution de l'énergie intégrant notamment un dispositif de stockage.

2.1.2.1 - Données techniques associés aux systèmes

Concernant, l'énergie solaire, nous nous intéresserons particulièrement à la production de l'énergie solaire photovoltaïque et à l'énergie solaire thermique. La simulation de la production

énergétique requiert des informations sur les données techniques du type de système EnR installé ainsi qu'une base de données météorologique du site d'implantation au pas de temps horaire.

Les données techniques sont à renseigner selon le type de système.

Pour un panneau photovoltaïque, nous devons renseigner :

- Le type de module solaire;
- La surface totale des modules (système);
- La puissance crête d'un module;
- Le nombre de modules;
- L'orientation du système;
- L'inclinaison du système;
- Le coefficient de puissance crête du système;
- Le facteur de performance du système.

Au niveau de la base de données météorologique nous nous intéressons aux paramètres météorologiques suivants : Rayonnement, Température, vent

Pour un système d'énergie solaire thermique, nous devons renseigner :

- Le type de composant;
- La surface des capteurs solaires;
- Le rendement des capteurs;
- Le volume de stockage du système (L);
- La valeur de la chaleur spécifique de l'eau;
- L'orientation des capteurs (en degré);
- L'inclinaison des capteurs (en degré);
- Le facteur optique B correspondant au rendement maximal (c'est-à-dire quand nous avons $T_m - T_{ext} = 0$);
- Le coefficient de transmission thermique K.

Au niveau de la base de données météorologique nous nous intéressons aux paramètres météorologiques suivants : Rayonnement, Température, vent

Pour un système éolien, nous devons renseigner :

- Le type d'éolien;
- La surface totale balayée par les pales de l'éolien;
- La puissance totale installée;
- Le nombre d'éoliens;
- Le coefficient de performance de l'éolien selon la vitesse du vent.

Au niveau de la base de données météorologique nous nous intéressons aux paramètres météorologiques suivants : vent, température.

2.1.3 - Bases conceptuelles d'outil de pilotage de la distribution de l'énergie

2.1.3.1 - La gestion entre consommation et production

Il existe deux modes d'association classiques d'un système de production électrique EnR à un système de consommation [53]:

- Sur des sites isolés la production d'électricité est directement consommée par les usagers bénéficiaires
- Sur des territoires desservis via un système de production existant, la production EnR est injectée sur le réseau dans le cadre de procédures bien définie.

Notre objectif dans cette thèse est d'explorer d'autres modes d'association répondant à des problématiques nouvelles : comment contribuer à lisser les pics de charge journalière au niveau des courbes de consommation électriques.

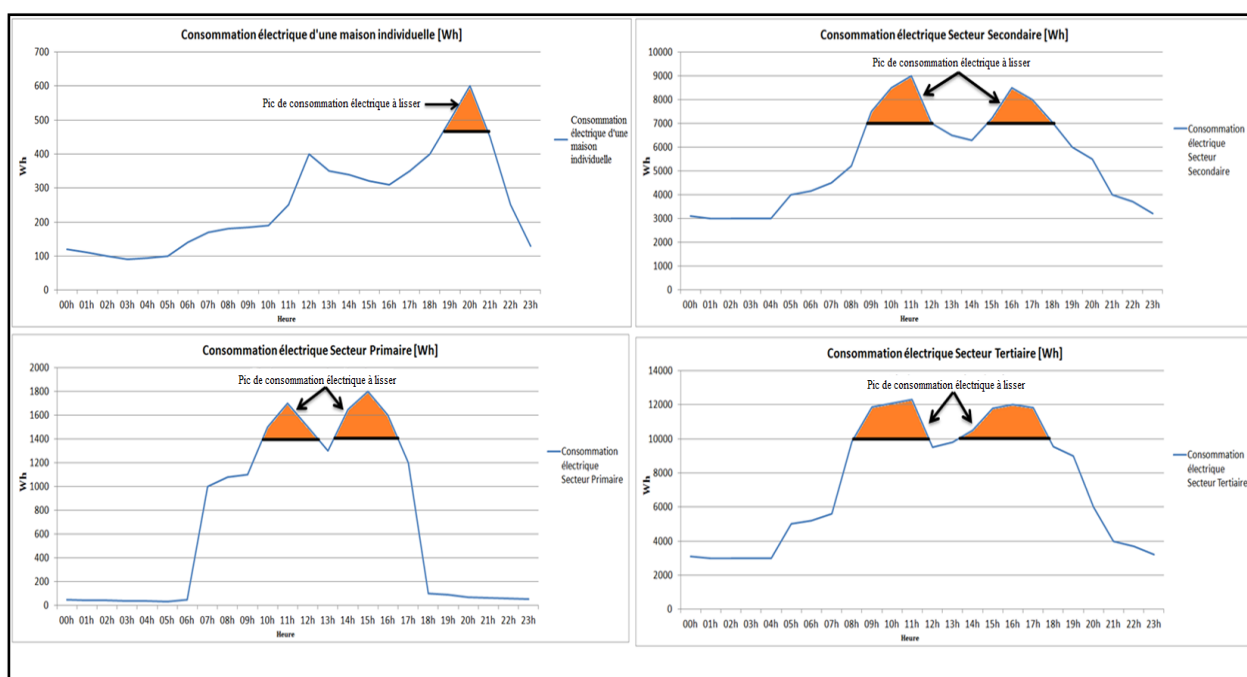


Figure 2.7 : Exemple courbe de charge des différents secteurs d'activité

Pour répondre à cette problématique nous pouvons faire appel à ces dispositifs de production à l'échelle de l'espace bâti mais aussi de façon plus judicieuse à des systèmes d'espace bâtis, voire des zones d'activité plus vastes pouvant s'identifier à des mini-territoires. Il faut se situer à une échelle où il nous sera possible de piloter la distribution de l'énergie électrique en répondant aux objectifs définis.

Il se pose dans un premier temps un problème de dimensionnement du système de production en rapport avec le système de consommation. Nous pouvons par exemple en condition normalisée de beau temps avoir la moyenne production d'EnR au même niveau que la moyenne de la consommation du système de consommation. Plusieurs hypothèses ou scénarios peuvent être envisagés autour du dimensionnement du système de production, en lien avec des critères économiques.

Associé à ce système de production nous intégrons un dispositif de stockage. Ce dispositif conditionne également la taille du système de consommation. Il nous faut envisager une capacité de stockage crédible en terme notamment technique et économique. Cette capacité de stockage sera dimensionnée selon les scénarios de distribution et les observations de lissage de la courbe de charge.

Nous nous proposons de mettre en liaison le système de consommation, le système de production d'EnR, le système de stockage et le réseau d'alimentation en électricité. Cette mise en liaison sera pilotée par un système de distribution qui gèrera le ciblage de la production d'EnR vers le système de stockage ou le système de consommation, le soutirage du système de consommation depuis le système de production d'EnR, le réseau électrique ou le système de stockage. Cette gestion se fera en direct, en lien avec des hypothèses de fonctionnement et des caractéristiques très variables de consommation et de production. Nous nous fixerons également des objectifs de lissage du soutirage sur le réseau.

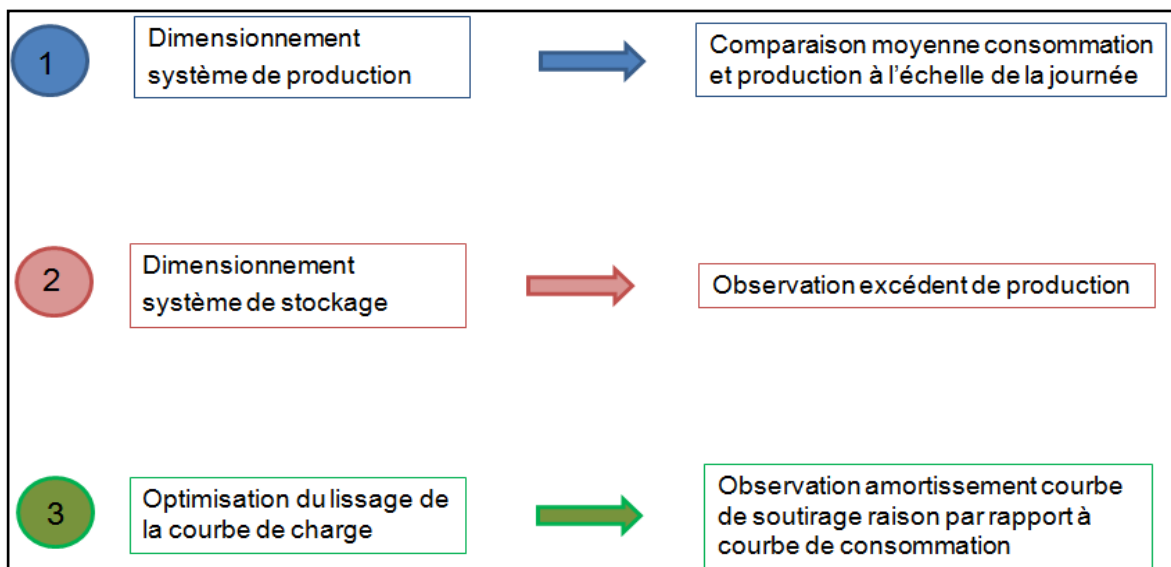


Figure 2.8 : Exemple du principe de fonctionnement d'un système de production et du stockage ainsi que de l'optimisation du lissage de la courbe de charge

2.1.3.2 - Principe de mise en œuvre

L'ensemble des fichiers horaires que nous serons amenés à mettre en œuvre, analyser et mettre en interaction seront réalisés sous l'interface Excel. Ces fichiers horaires sur l'année expliciteront les données suivantes :

- Fichiers consommations sur la journée type
- Fichiers facteurs d'usage horaire
- Fichiers consommations horaires
- Fichiers données météorologiques horaires
- Fichiers productions horaires d'EnR
- Fichiers stockage instantané
- Fichiers stockage cumulé
- Fichiers soutirage réseau

À ces données s'ajouteront des fichiers de facteurs de pondération traduisant les différentes configurations de fonctionnement, et des coefficients journaliers de lissage.

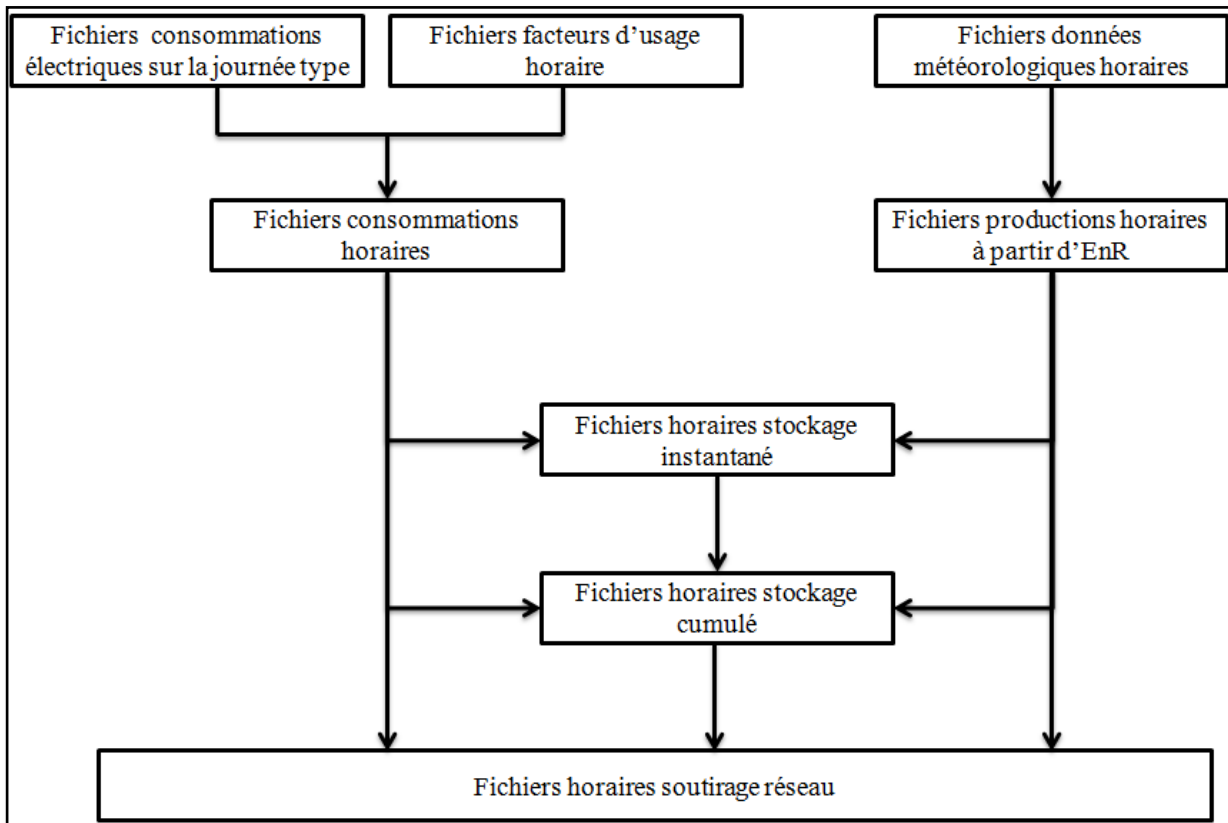


Figure 2.9 : Organigramme des fichiers horaires

2.2 - DEVELOPPEMENT DE L'OUTIL D'ÉVALUATION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

2.2.1 - Objectifs autour du développement de l'outil d'évaluation

Neria RAKOKOTONARIVO, dans le cadre de sa thèse a développé un outil d'évaluation type associé à un espace bâti donné. Chaque espace bâti devait faire l'objet d'une réalisation propre. L'opérateur devait donc reprendre l'ensemble des étapes de réalisation de l'outil pour chaque projet d'étude. Un travail qui s'avère très fastidieux et qui ne permettait que difficilement de se situer par rapport à un cadre normatif. Il s'agit donc dans un premier temps dans le cadre de cette thèse, de réfléchir à une traduction plus approfondie des références normatives pour définir des pages génériques qui pourraient être reprises de manière intégrale dans la réalisation d'outils dans les phases de description, d'acquisition de données, de calcul et d'analyse[54] [55] [56].

Les différents points particuliers autour de ces développements sont les suivants :

- Des espaces clairement explicités dans les pages génériques permettraient de réaliser ces différentes étapes dans une approche normative en lien notamment avec les normes ISO d'Analyse de Cycle de Vie[57] [58] [59]:
 - Définition d'un espace de navigation autour des descriptions spatiales
 - Définition d'un espace de navigation autour des descriptions fonctionnelles a été également définie
 - Définition d'un espace d'acquisition de données et de calcul

- Définition d'un espace de navigation autour des résultats et analyses induites de l'Outil d'évaluation.
- Une meilleure définition des données de description générales des sous-systèmes associés à l'espace bâti en vue notamment des mises en œuvre de facteurs de pondération dans les phases de calcul et des ratios dans les phases d'analyse des résultats.
- Une détermination plus approfondie des facteurs de pondération établissant des corrélations traduisant les différentes configurations de structures et de fonctionnement.
- Un passage d'outil d'analyse à d'outils de mise en œuvre de fichiers de consommation.
- Une définition d'un cahier des charges explicitant chaque espace bâti en amont de la réalisation de l'outil de simulation.

2.2.1.1 - Cahier des charges

Ce cahier des charges a pour objectif de compiler l'ensemble des informations permettant de décrire de manière appropriée l'espace bâti au niveau des paramètres structurels et fonctionnels les plus pertinents.

Il permet également de traduire ces informations dans les pages génériques qui nous permettront de construire l'outil de simulation et d'analyse.

Cinq niveaux d'identification sont définis :

- L'espace bâti (E.B) → Nous caractérisons l'E.B et nous identifions le(s) bâtiment(s) présent(s)
- Les bâtiments → Nous caractérisons le bâtiment et nous identifions les espaces fonctionnels présents
- Les espaces fonctionnels (E.F) → Nous caractérisons les E.F et nous identifions les postes de consommation présents que ce soit les postes de consommation transversaux ou spécifiques
- Les postes de consommation (P.C) → Nous caractérisons les P.C et nous identifions les composants présents
- Les composants → Nous caractérisons chaque composant

Ces cinq niveaux d'identification sont explicités sur les figures ci-dessous.

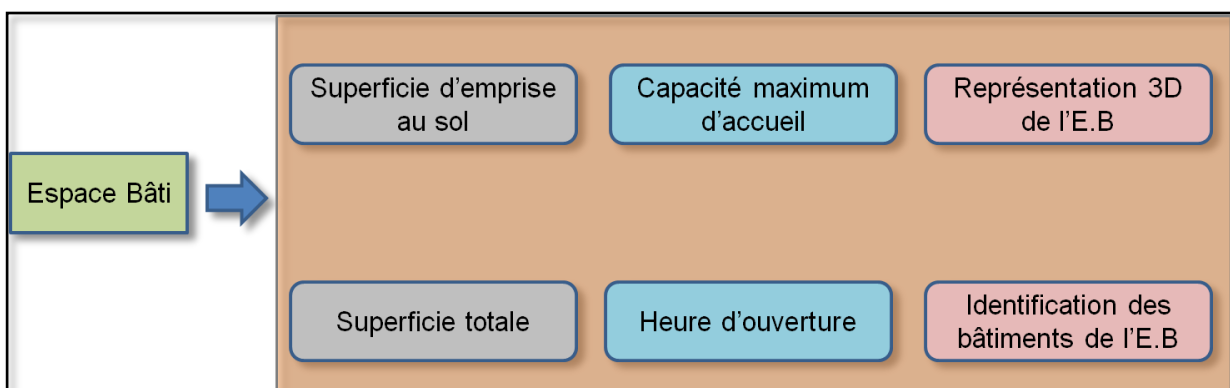


Figure 2.10 : Étape de caractérisation d'un espace bâti et identification des bâtiments

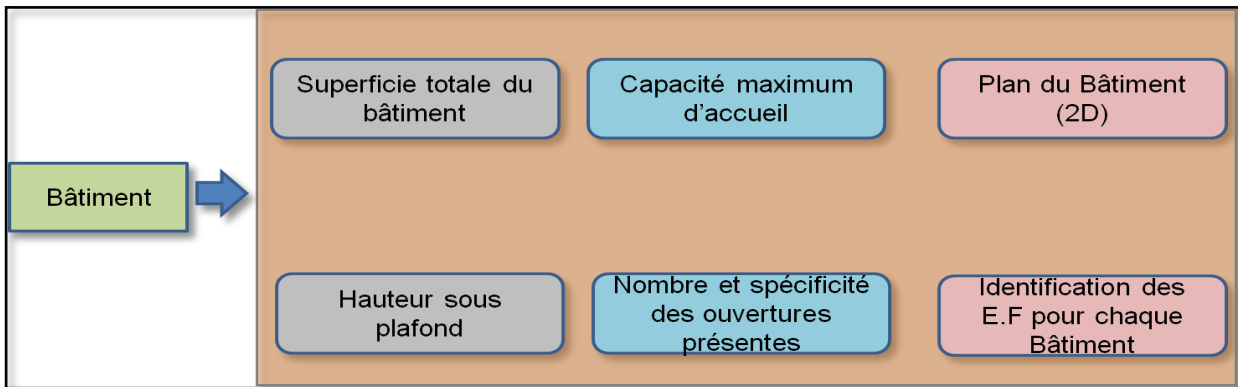


Figure 2.11 : Étape de caractérisation d'un bâtiment et identification des espaces fonctionnels

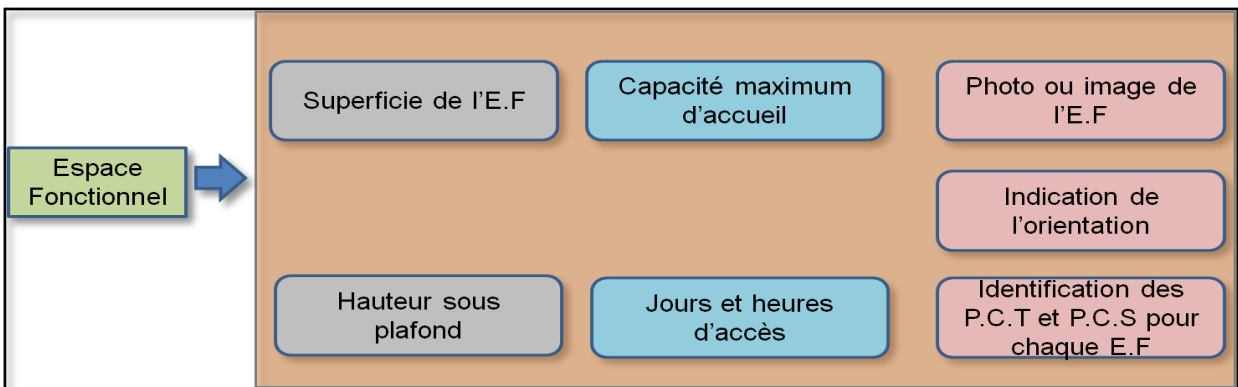


Figure 2.12 : Étape de caractérisation d'un espace fonctionnel et identification des postes de consommation transversaux et spécifiques

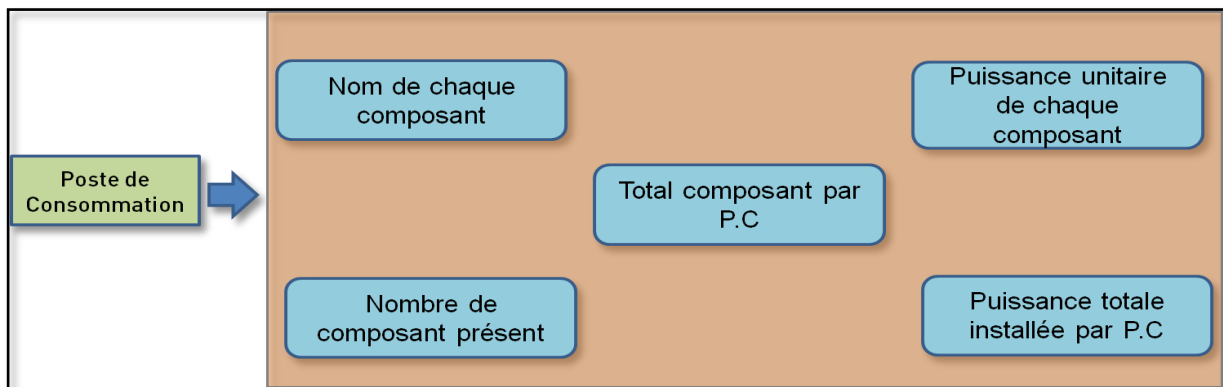


Figure 2.13 : Étape de caractérisation d'un poste de consommation et identification des composants

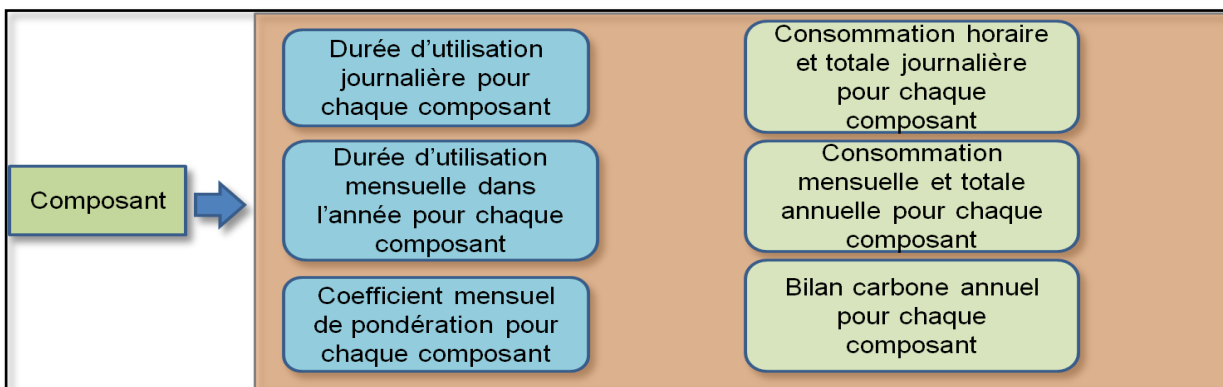


Figure 2.14 : Étape de caractérisation d'un composant et acquisition des données

2.2.1.2 - Présentation des pages génériques

La création des pages génériques s'est imposée par le fait qu'il devenait lourd de réaliser un outil dans toutes ses étapes à chaque nouvelle simulation alors qu'il existe des éléments invariants dans l'outil.

Nous présentons ici, la construction de ces différentes pages génériques, en tentant de faire le parallèle avec l'outil de base réalisé. Nous donnerons sur cette partie que des figures illustrant la construction de l'outil évolutif, mais on ne rentrera pas dans les détails sur la présentation du système d'espace bâti. Cette partie de présentation de cas d'application sur un système d'espace bâti sera traitée au niveau du chapitre III suivant.

Au niveau de l'outil avec les pages génériques, nous débutons avec une page d'accueil qui permet de choisir le type de flux que nous souhaitons étudier entre le flux d'énergie ou de matière. Nous allons aussi retrouver quelques renseignements sur le porteur de projet et le nom du projet. La Figure 2.15 ci-dessous montre la page d'accueil de l'outil avec les pages génériques.

Outil de simulation et d'analyse de la qualité environnementale d'un Système Espace Bâti (S.E.B.) autour des Flux de Matière (F.M.) et des Flux d'Énergie (F.E.)

L'outil réalisé analyse les performances et la qualité environnementales d'un Système Espace Bâti. La méthode consiste à une analyse du cycle de vie (ACV) multicritères : les flux énergétiques et les flux de matière.

FICHE DE RENSEIGNEMENT (Personne réalisant la simulation)

Civilité : Profession :
NOM :
Prénom : Date de la réalisation de l'acquisition de données :
Âge : Objectifs de la simulation :
Adresse :
CP Ville :

FICHE DE RENSEIGNEMENT (système espace bâti)

Système Espace Bâti étudié : **Nom du S.E.B**

Flux de matière

Flux d'énergie

Figure 2.15 : Page générique de la page d'accueil de l'outil évolutif

En cliquant, sur l'un des deux cadres situés sur la droite de la page d'accueil, nous accédons à la page générique du système espace bâti de la Figure 2.16 ci-dessous.

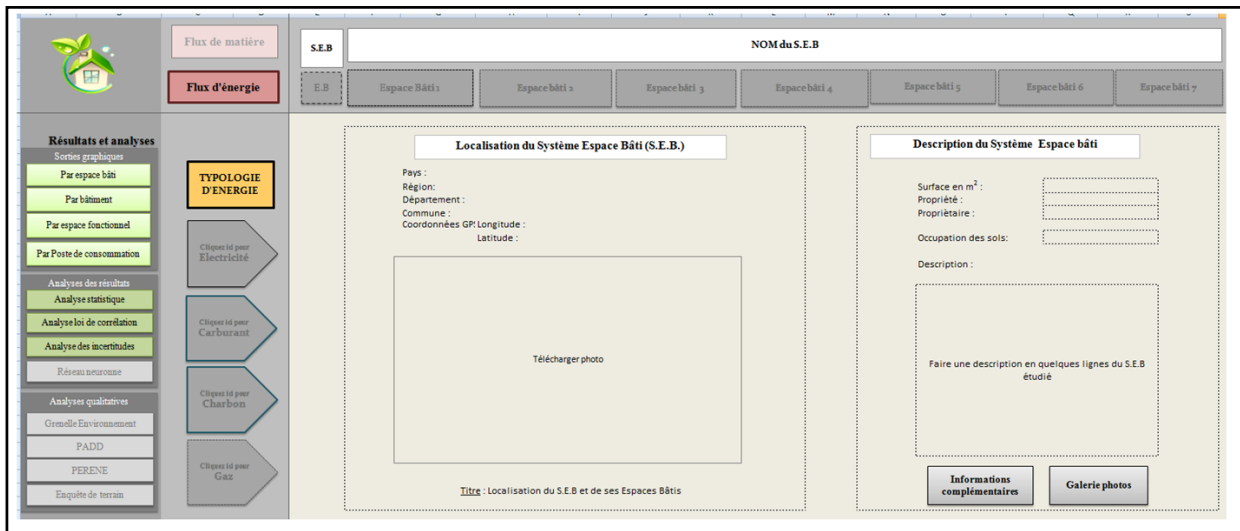


Figure 2.16 : Page générique Système Espace Bâti

À partir de cette page de la Figure 2.16, nous pouvons ensuite accéder à n'importe quel espace bâti du système d'espace bâti étudié. Sur la page S.E.B, il y a diverses informations liées au système d'espace bâti étudié notamment :

- Sur la gauche, nous donnons des informations concernant les sorties de résultats au niveau du S.E.B. Ces résultats sont donnés sur plusieurs échelles d'observation. Il y a les résultats à l'échelle des postes de consommation, à l'échelle des espaces fonctionnels, à l'échelle des bâtiments et à l'échelle des espaces bâtis. Tous ces résultats sont donnés au niveau de l'ensemble du système d'espace bâti;
- Le type de flux étudié. En l'occurrence le flux d'énergie sur notre cas;
- La présence d'un bandeau sur le haut mentionnant le nom du système d'espace bâti (S.E.B) sur lequel l'étude est menée. Et juste en dessous, on énumère l'ensemble des espaces bâtis constitutifs du S.E.B;
- Les différentes typologies d'énergie que l'outil est amené à étudier dans l'avenir. Mais pour le moment nous nous intéressons exclusivement au flux d'énergie relatif à l'électricité;
- Sur le milieu, nous donnons la localisation exacte du S.E.B et une photo illustrative de sa localisation dans l'espace d'étude;
- Sur la droite, nous donnons des informations plus détaillées du S.E.B par exemple, sa surface, le nom du propriétaire, etc. Nous donnons aussi une description succincte, sans oublier bien évidemment un onglet qui permet si nécessaire de mettre encore quelques informations détaillant le S.E.B étudié.

En prenant l'exemple du S.E.B dont une étude approfondie est réalisée sur le chapitre III, cela donne une configuration présentée au niveau de la Figure 2.17 ci-dessous.

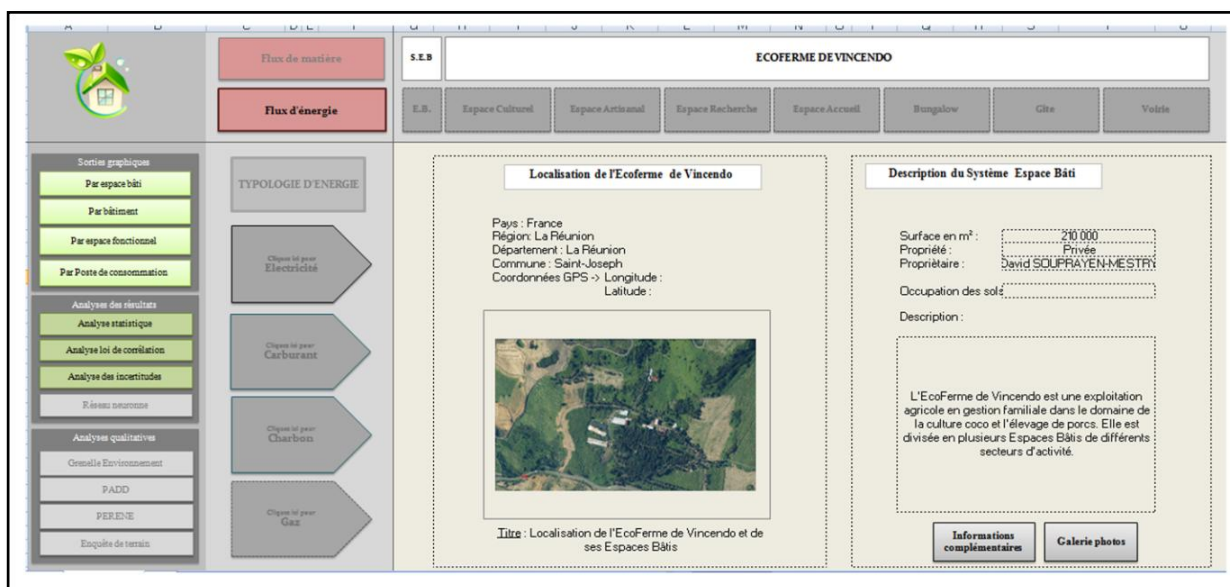


Figure 2.17 : Exemple de visualisation d'une page concrète d'un système d'espace bâti

En cliquant sur l'un des onglets permettant de naviguer aux différents espaces bâtis, nous arrivons à la page générique présentée ci-dessous.

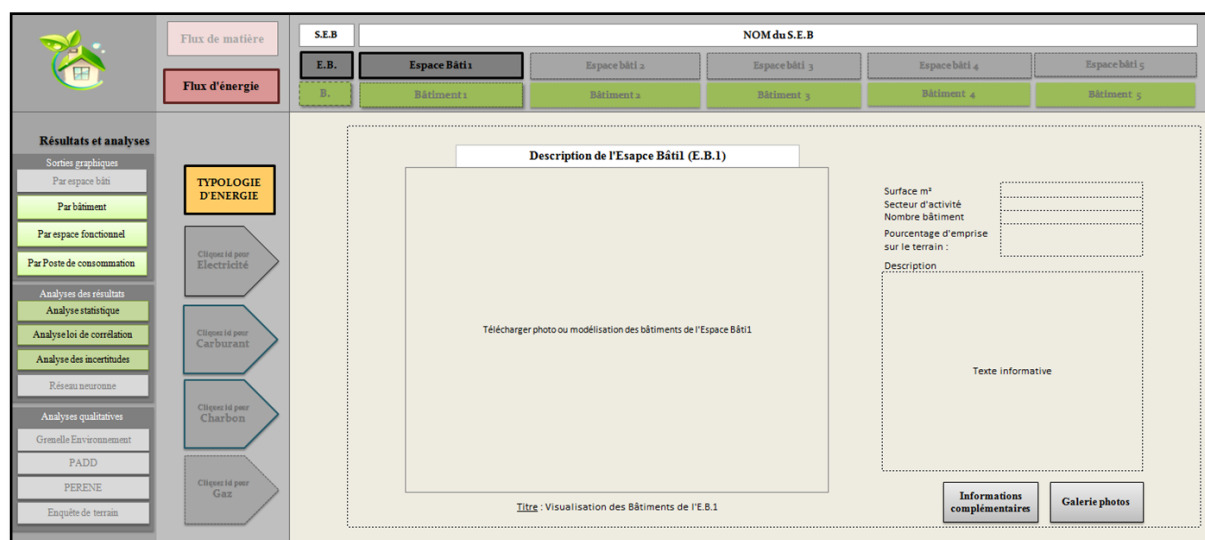


Figure 2.18 : Page générique espace bâti

Cette Figure 2.18 illustre la présentation de la page espace bâti. Lorsque, nous nous trouvons au niveau de la page espace bâti de l'outil évolutif, nous accédons à diverses informations relatives à l'espace étudié comme pour la page système espace bâti. Par ailleurs, notons la présence d'une ligne d'information sur la barre de navigation structurale située sur le haut de la page. Nous visualisons au niveau de la page espace bâti, l'ensemble des bâtiments se rapportant à l'espace bâti étudié. Pour les résultats, nous aurons maintenant une échelle de résultat sur trois niveaux dont nous avons déjà fait les présentations. Ce qui donne, par exemple, une fois les données entrées sur cette page, la visualisation ci-dessous.

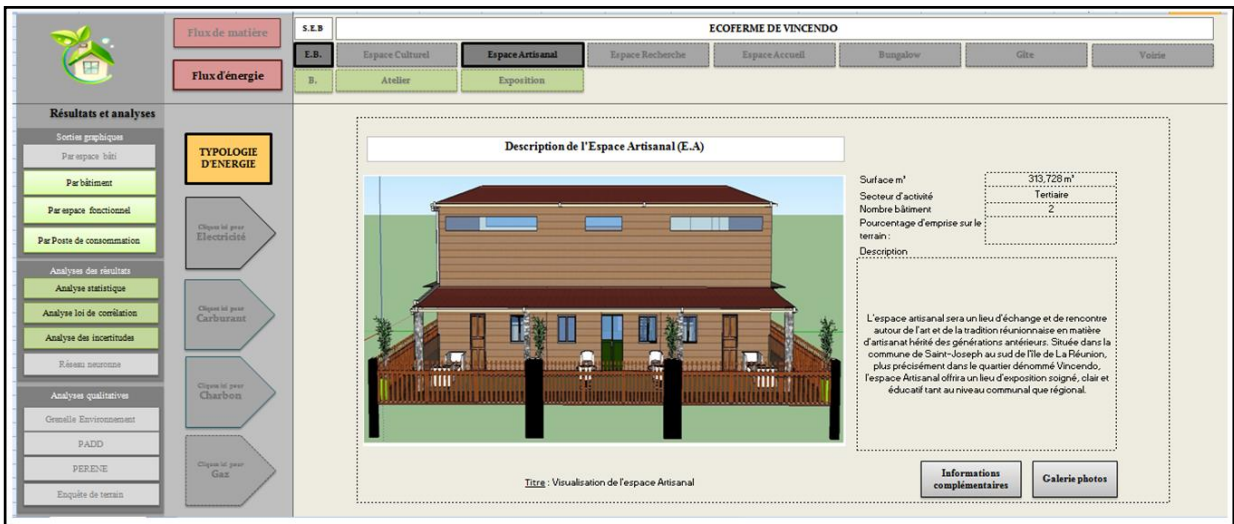


Figure 2.19 : Visualisation d'une page concrète d'un espace bâti

À la suite de la page espace bâti, nous arrivons à une page bâtiment dont la Figure 2.20 ci-dessous donne un éclairage sur la disposition de cette page.

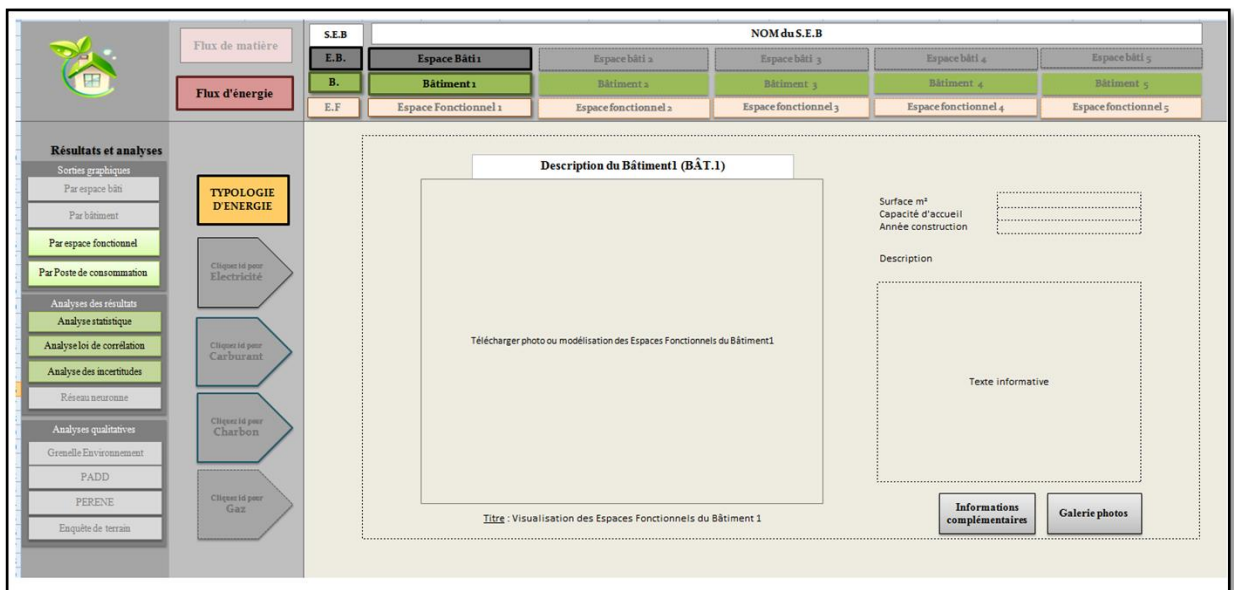


Figure 2.20 : Exemple page générique d'un bâtiment

Sur cette page bâtiment, nous notons que la présentation est la même que sur les autres pages. La différence réside qu'à ce niveau, nous pouvons visualiser une ligne de navigation vers l'ensemble des espaces fonctionnels du bâtiment étudié sur le haut de la navigation structurale et aussi la visualisation des résultats qui diminue à deux échelles. La Figure 2.21 illustre à titre d'exemple d'application cette page bâtiment.

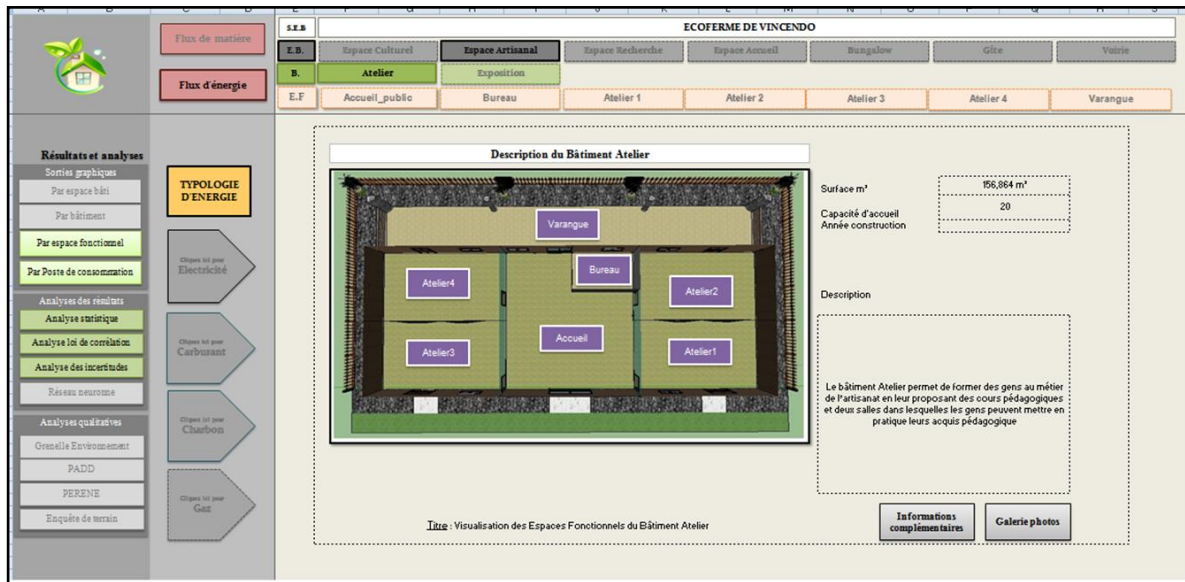


Figure 2.21 : Visualisation d'une page concrète bâtiment

Après, cette page bâtiment, nous arrivons à la page présentée sur la Figure 2.22 ci-dessous et qui représente les Espaces Fonctionnels.



Figure 2.22 : Exemple page générique d'un espace fonctionnel

Sur cette page espace fonctionnel, nous notons en premier lieu qu'il y a une visualisation de l'ensemble des postes de consommation transversaux existants. Sur cette page, l'utilisateur a le choix d'indiquer si un poste de consommation est présent ou pas sur l'espace fonctionnel étudié au niveau de la colonne numéro deux du tableau. Lorsque l'utilisateur indique qu'un poste de consommation est présent, dans ce cas il y a une coloration qui apparaît pour indiquer la présence de ce poste de consommation sur l'espace fonctionnel, en plus de l'affichage en majuscule de ce poste de consommation. Dans le cas échéant, l'affichage reste en minuscule et il n'y a aucune couleur qui apparaît. C'est au niveau de cette page poste de consommation qu'il est possible de visualiser quelle typologie d'énergie est étudiée. Il est à noter, la présence d'une seule échelle de résultat au niveau de l'espace fonctionnel et c'est au niveau des postes de consommation. Il existe un petit onglet sous les postes de consommation qui indique s'il

existe des postes de consommation spécifiques ou non au niveau de l'espace fonctionnel étudié. La Figure 2.23 ci-dessous permet de mieux visualiser lorsqu'il y a une présence de postes de consommation spécifiques, en plus d'être un exemple de visualisation concret d'une page espace fonctionnel.

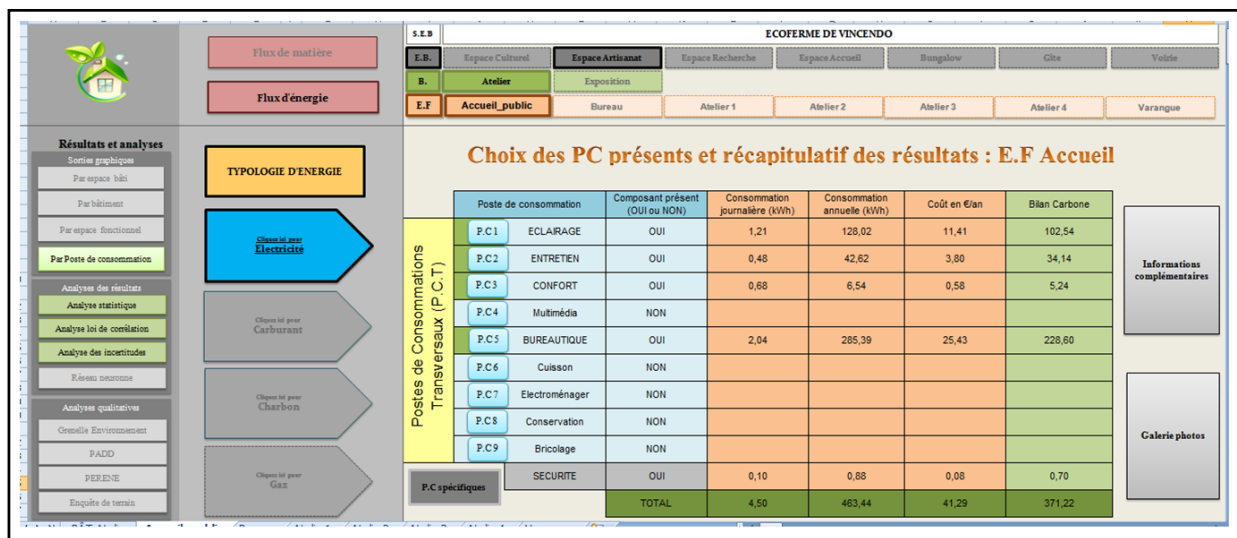


Figure 2.23 : Visualisation d'une page concrète Espace Fonctionnel

En cliquant sur un des postes de consommation, nous arrivons à la page poste de consommation qui peut être soit une page poste de consommation transversale ou une page poste de consommation spécifique. La structure et l'organisation sont la même sur ces deux pages. Nous donnons en premier lieu une présentation d'une page poste de consommation transversal et ensuite une page poste de consommation spécifique ci-dessous.

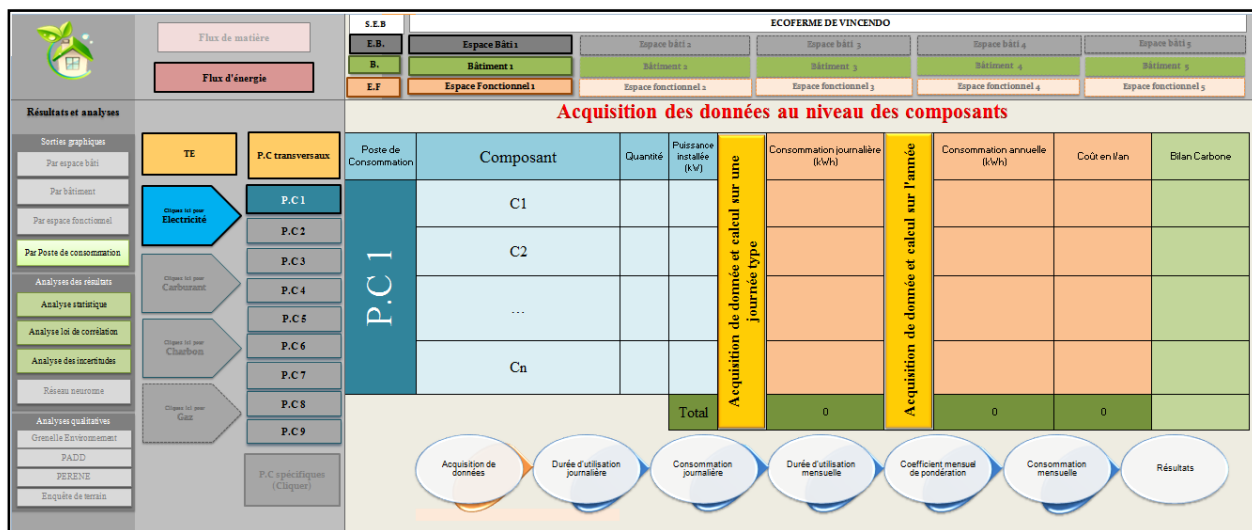


Figure 2.24 : Exemple page générique postes de consommation transversales

Sur cette page générique « poste de consommation », la navigation entre les différents postes de consommation est rendue possible par la barre verticale des postes de consommation entre la typologie

d'énergie et l'énumération des postes de consommation. Comme énoncé un peu plus haut, la présence d'un poste de consommation est indiquée par une couleur et la notation en lettre majuscule du poste de consommation. C'est à partir de cette page que commence réellement l'acquisition des données sur l'outil permettant d'évaluer la consommation énergétique ainsi que le bilan carbone associé pour chaque composant, puis PC et remonter ainsi de suite par l'approche systémique jusqu'au niveau du système d'espace bâti.

Ci-dessous, nous avons la page d'un poste de consommation spécifique dont le fonctionnement et la structure sont le même que pour le poste de consommation transversal. La navigation vers les postes de consommations spécifiques est possible à tout moment lorsque nous nous trouvons sur les pages postes de consommation à l'aide de l'onglet "PC spécifiques" situé en dessous des postes de consommation transversaux et réciproquement.

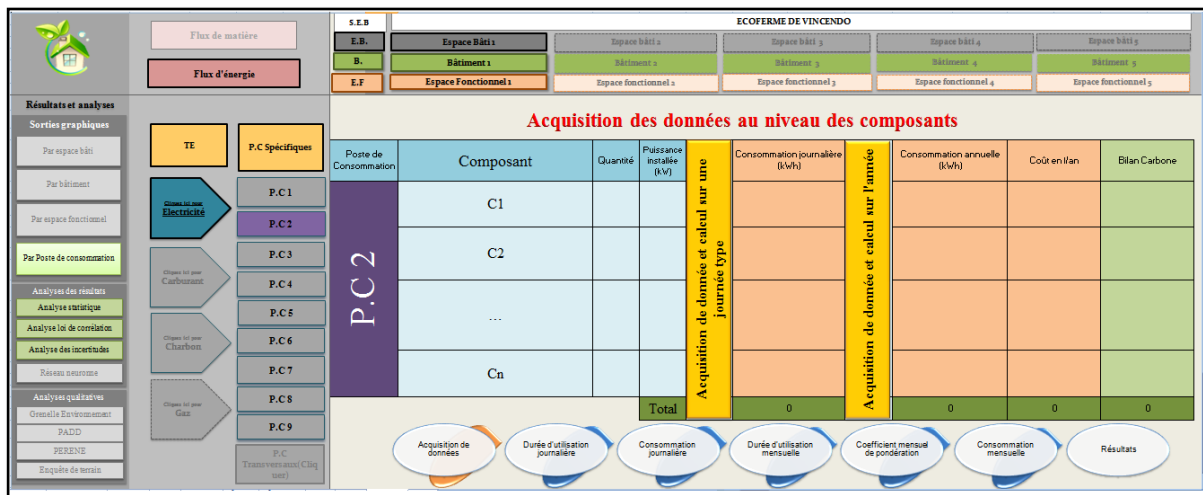


Figure 2.25 : Page générique poste de consommation spécifique

Suite à la visualisation des différentes pages illustrant la description des pages au niveau des postes de consommation, à présent, nous allons visualiser sur un exemple concret la structure des pages.

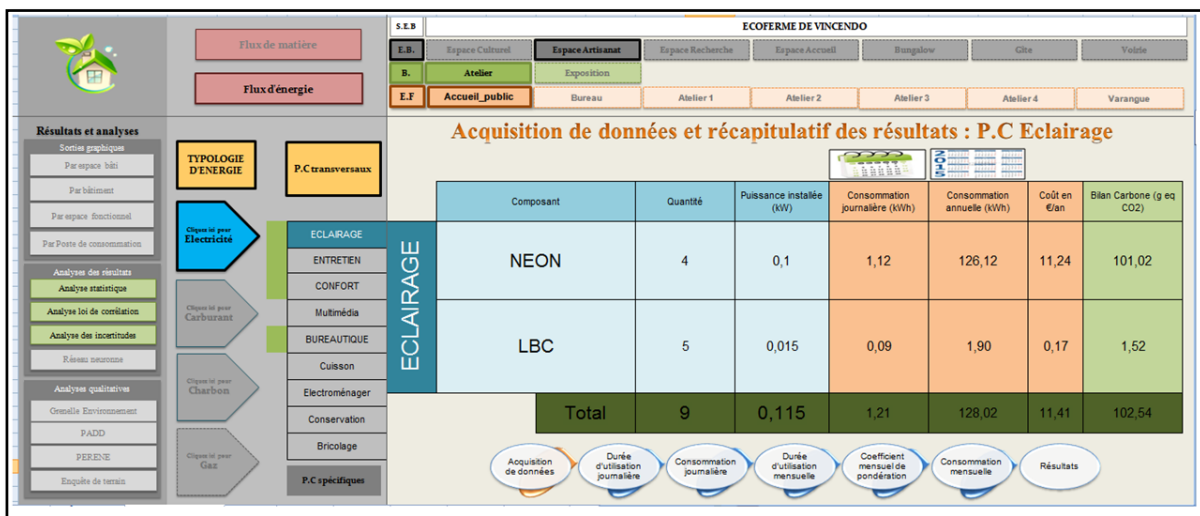


Figure 2.26 : Visualisation page concrète poste de consommation transversale

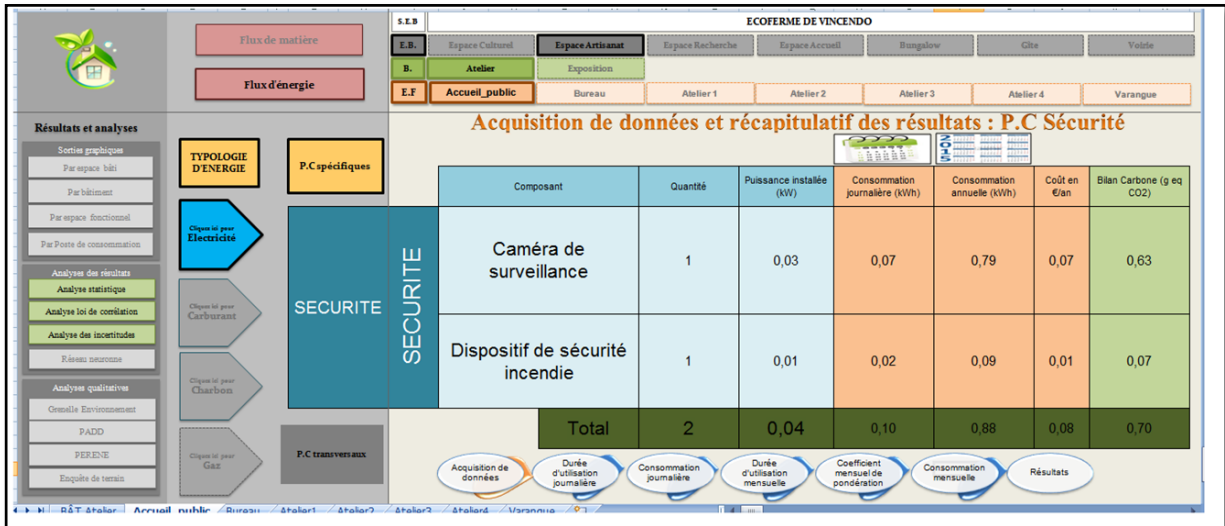


Figure 2.27 : Visualisation d'une page concrète poste de consommation spécifique

Sur ces deux figures Figure 2.26 et Figure 2.27, nous observons un élément en dessous du tableau d'acquisition de donnée et de récapitulatif de résultat. Cet élément représente les différentes pages relatives à l'acquisition de données et des résultats au niveau des composants. Il est possible d'y accéder en cliquant dessus. Nous représentons cet élément sur la Figure 2.28.

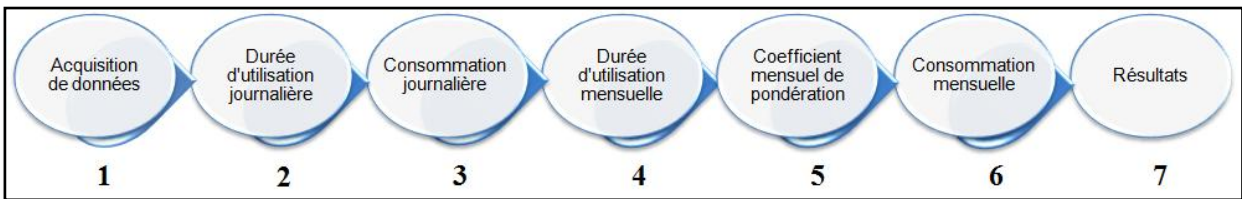


Figure 2.28 : Bande de navigation entre les pages de l'outil

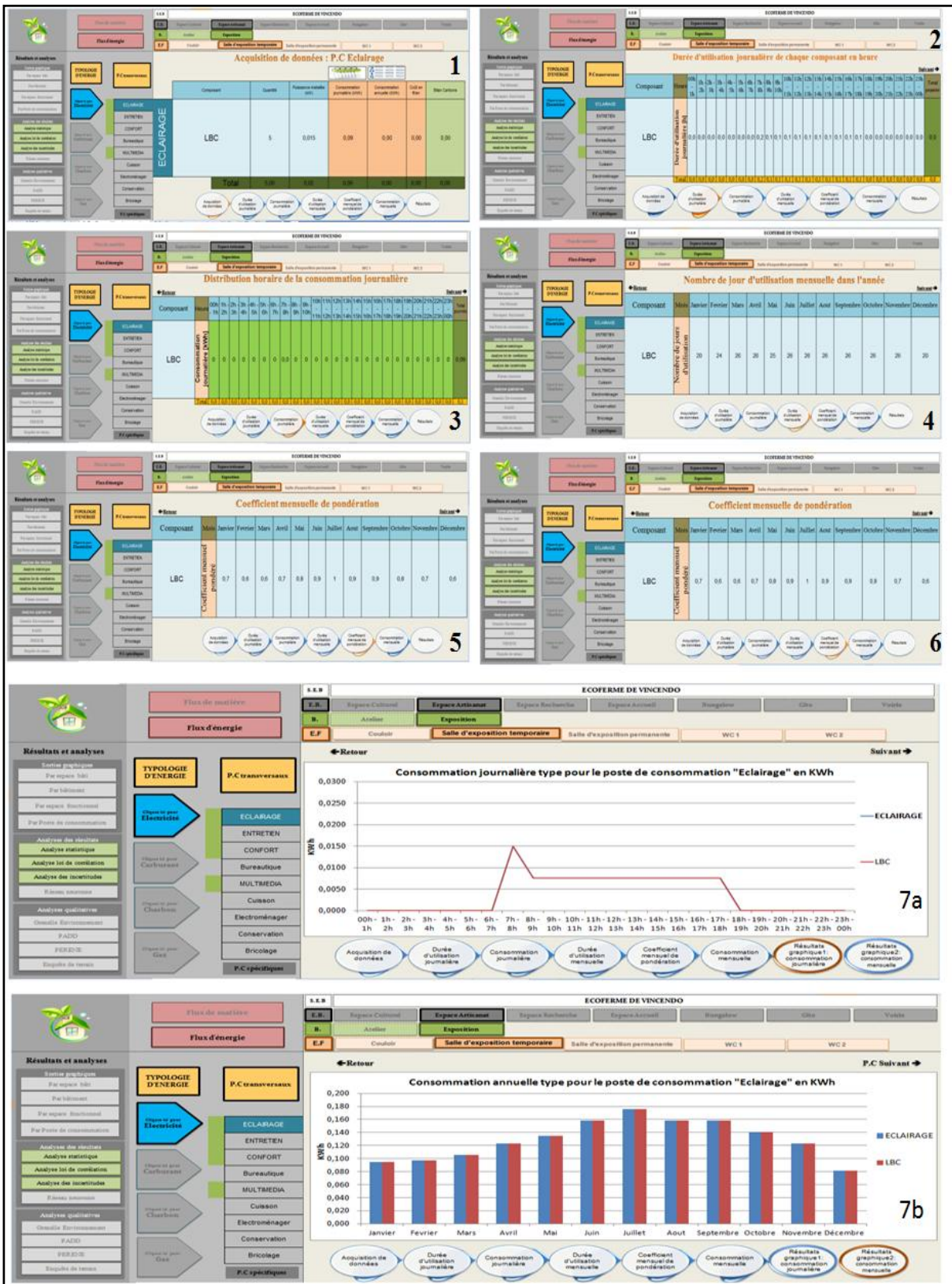


Figure 2.29 : Affichage détaillée de la navigation du bandeau

Nous venons de voir l'ergonomie du nouvel outil, mis en place, afin d'améliorer la navigation et une meilleure utilisation de l'outil avec les différentes pages génériques. Nous allons maintenant nous intéresser plus particulièrement à l'amélioration des acquisitions des données et plus particulièrement de l'acquisition des données au niveau des coefficients mensuels de pondération.

2.2.1.3 - Coefficients mensuels de pondération

Les coefficients mensuels de pondération sont définis et utilisés pour extrapoler la consommation énergétique sur une journée type d'un mois observé à des journées types pour l'ensemble des mois de l'année. Ces coefficients mensuels de pondération sont évalués à partir de plusieurs analyses basées sur les données climatiques "weather tool", des résultats de logiciels de simulation de fonctionnement thermique des bâtiments notamment "Energy +", ou encore d'éclairage naturel au sein d'un bâtiment. Plusieurs paramètres comme notamment la température et le rayonnement nous permettent d'estimer ces coefficients. Nous présentons au niveau du Tableau 2.1 une analyse des paramètres influençant les besoins en consommations énergétiques selon les postes de consommations. Ce tableau a été réalisé par nos soins à partir d'échange avec mon directeur vu la nouveauté de notre démarche. Elle vise à donner une première démarche quant aux facteurs d'influence par poste de consommation et il est vivement conseillé de pouvoir l'améliorer à l'aide d'une thèse.

Tableau 2.1 : Facteurs d'influence par poste de consommation

Facteurs d'influence / Postes de consommation	Surface	Nombre de personne présente	Orientation	Taux d'utilisation	Rayonnement	Température	Puissance installée
Entretien							
Eclairage							
Confort							
Bureautique							
Électroménager							
Cuisson							
Conservation							
Multimédia							
Bricolage							

Au niveau du Tableau 2.1, nous voyons différents degrés d'influence selon l'intensité de couleur. Plus l'intensité de la couleur est forte, et plus le facteur est influent au niveau du poste de consommation.

Pour les simulations sur Energy+, nous commençons par modéliser l'espace bâti en utilisant le logiciel Google Sketchup à l'aide d'un patch se situant sur Sketchup permettant d'enregistrer après le fichier sous un format reconnu sur Energy+ (nous enregistrons le fichier sous format .idf). Ensuite, nous avons procédé à la création de zones thermiques au niveau de l'espace bâti pour pouvoir ressortir les résultats.

Après les simulations au niveau d'Energy+, nous avons pu ressortir les coefficients de pondération au niveau des postes de consommation "Éclairage" et "Confort" en fonction de la température et du rayonnement du site d'étude. Pour certains postes de consommation, il est possible d'obtenir les coefficients de pondération au niveau des postes de consommation par similitude par exemple. Nous notons aussi que pour certains postes de consommation ce coefficient de pondération est égal à 1. Le Tableau 2.2 ci-dessous résume les coefficients de pondération calculés.

Tableau 2.2 : Récapitulatif des coefficients de pondération par poste consommation dans l'année

Mois Poste de consommation	Mois											
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Entretien	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eclairage	1	0,98	0,96	0,94	0,92	0,9	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	1
Confort	1	0,9	0,7	0,5	0	0	0	0	0	0,6	0,9	1
Bureautique	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Électroménager	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cuisson	1,00	1,01	1,02	1,02	1,04	1,09	1,11	1,12	1,08	1,05	1,01	0,98
Conservation	1	0,99	0,98	0,98	0,96	0,92	0,9	0,89	0,93	0,95	0,99	1,02
Multimédia	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bricolage	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Ces coefficients calculés sur Energy+ sont propres à la localisation de notre territoire d'étude. Ils sont obtenus en utilisant les données météorologiques propres du site. Du coup, ces coefficients seront à simulés et calculés à chaque nouveau projet sur un nouveau lieu.

2.2.1.4 - Signature énergétique et analyse

Au niveau du nouvel outil développé, nous soulignons la présence d'un bandeau vertical qui permet d'accéder aux signatures énergétiques selon l'espace sur lequel l'utilisateur se situe et qui permet aussi d'accéder à des analyses plus détaillées par exemple des analyses statistiques, de loi de corrélation, analyse d'incertitude ou encore réseau de neurone. Durant cette thèse, nous n'avons pas abordé cette partie, cependant c'est un travail qui serait très intéressant à mener dans les perspectives futures. Nous montrons sur la Figure 2.30 le bandeau qui permettra d'y accéder. Pour le moment, nous pouvons visualiser que les résultats au niveau des sorties graphiques.

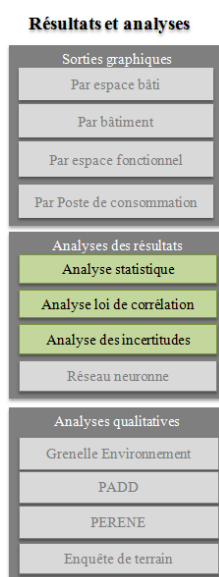


Figure 2.30 : Bandeau de navigation vertical vers les résultats et analyses

2.2.1.5 - Simulation horaire de la consommation énergétique sur une année

Jusqu'à présent, les outils créés pour la simulation de la consommation énergétique d'un espace bâti ont permis de ressortir des résultats des consommations énergétiques sur une journée type et sur l'année par mois. En s'appuyant sur les résultats au niveau de la journée type, nous pouvons obtenir la consommation énergétique tout au long de l'année par mois et par heure pour un espace bâti étudié. Afin d'avoir les résultats sur la consommation énergétique pour chaque jour et chaque heure de l'année, nous avons procédé comme suit :

- Sommer le total des consommations au niveau d'une journée type pour chaque poste de consommation de même nature afin de calculer la consommation pour un espace fonctionnel sur la journée type
- Sommer le total de la consommation sur la journée type pour l'ensemble des espaces fonctionnels afin d'en ressortir celle du bâtiment au niveau de la journée type pour chaque poste de consommation
- Renseignement des coefficients de pondération selon le poste de consommation sur chaque mois dans l'année

Sur le fichier développé pour évaluer la consommation énergétique d'un espace bâti sur chaque jour et heure de l'année, nous avons marqué les jours fériés en rouge et procédé comme suit pour le calcul :

- Construire un tableau avec les coefficients de pondération au niveau annuel sur chaque mois et pour chaque poste de consommation
- À l'aide du total de la consommation sur la journée type au niveau d'un bâtiment et des données de profil d'usage et des coefficients de corrélation, nous avons calculé les résultats de consommations journalières et horaires du bâtiment et les résultats de consommations horaires et journalières par P.C.

Nous avons utilisé la formule de l'équation ci-dessous afin d'évaluer la consommation énergétique d'un espace bâti sur chaque jour et heure de l'année :

Calcul de la consommation horaire sur chaque jour de l'année

$$C_{hj} = C_{hjt} * Coef_{hp} * P_{hj}$$

Avec :

C_{hj} : Consommation d'un poste de consommation sur une heure "h" et jour "j"

C_{hjt} : Consommation du poste de consommation au niveau de la journée type sur l'heure "h"

$Coef_{hp}$: Coefficient de pondération mensuel du poste de consommation

P_{hj} : Profil d'utilisation du poste de consommation sur l'heure "h" et jour "j"

Les tableaux de construction de l'outil seront présentés en détail sur le chapitre III.

Les points essentiels à retenir sur cet outil sur l'évaluation de la consommation énergétique heure par heure sur l'année sont :

- Prise en compte des jours fériés et des week-ends en intégrant des profils d'utilisation selon le jour
- Permet l'évaluation de la consommation énergétique pour chaque heure de l'année
- Permet l'évaluation de la consommation énergétique pour chaque jour de l'année.

Nous présentons ci-dessous un organigramme montrant la structure de l'outil de consommation énergétique au pas de temps horaire dans l'année par poste de consommation.

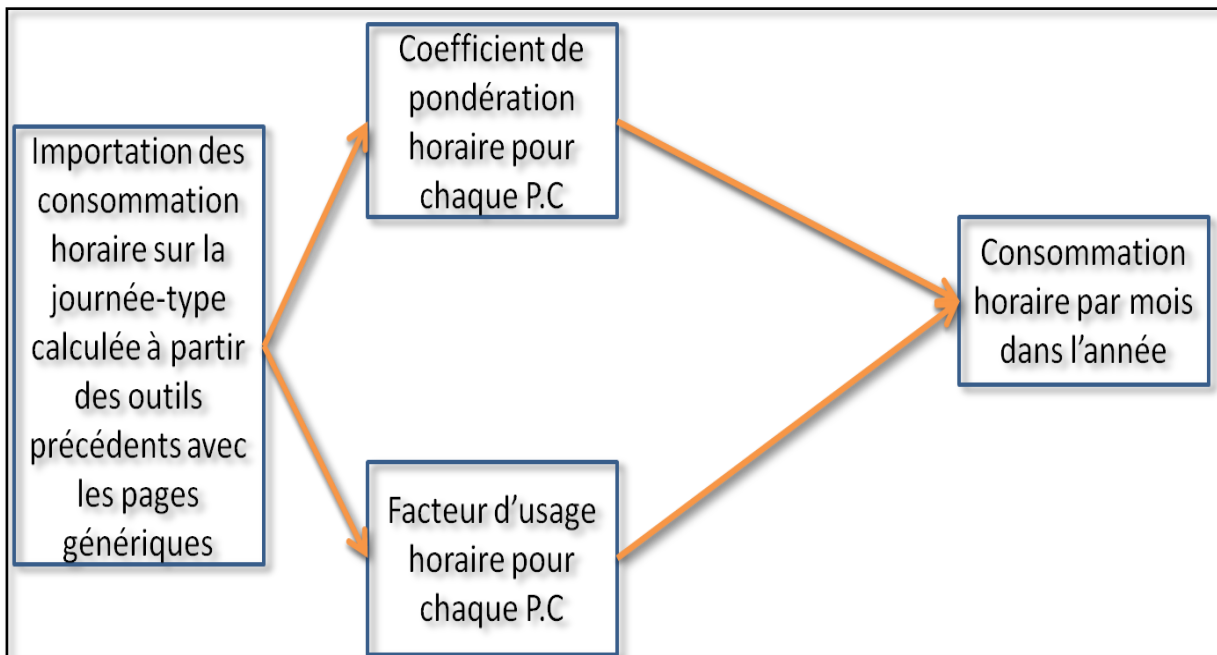


Figure 2.31: Organigramme outil d'évaluation de la consommation annuelle énergétique au pas de temps horaire d'un poste de consommation

Nous présentons ci-dessous sur la Figure 2.32, des visualisations des pages que nous avons créés afin de nous permettre d'évaluer la consommation énergétique à l'échelle horaire sur un mois dans l'année en fonction des postes de consommations.

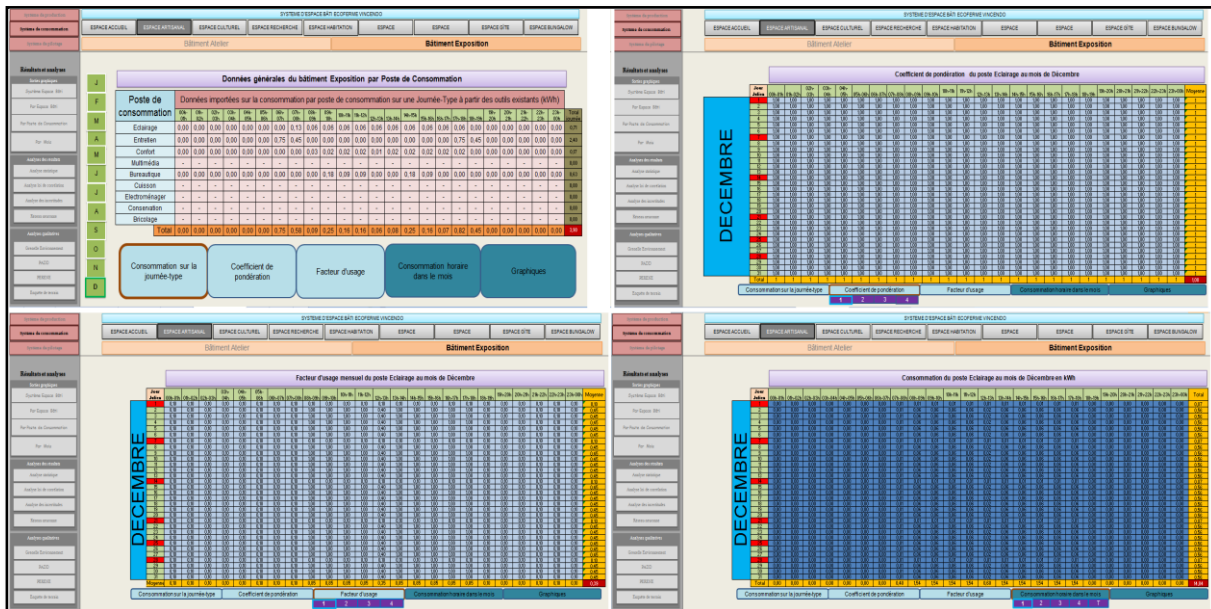


Figure 2.32 : Exemple de visualisation des pages d'évaluation de la consommation énergétique au pas de temps de l'heure

Nous venons de montrer dans cette section comment évaluer la consommation énergétique sur un espace bâti et un système d'espace bâti sur une journée type, et sur n'importe quel jour dans l'année au pas de temps horaire. À présent, nous allons passer à la modélisation d'un outil de production énergétique d'origine EnR au pas de temps horaire.

2.3 - OUTIL D'ÉVALUATION DE LA PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE

2.3.1 - Présentation générale

Cette section présente en détail l'architecture de l'outil de production énergétique basé sur les EnR.

L'outil développé permet d'avoir une estimation de la production énergétique d'origine EnR d'un site donné. En effet, selon le site étudié, l'utilisateur pourra utiliser cet outil pour estimer la production au niveau de trois types de production EnR qui sont :

- La production EnR basée sur le photovoltaïque
- La production EnR basée sur l'éolien
- La production d'eau chaude solaire à partir de capteur solaire.

L'utilisateur peut soit mener une étude sur l'ensemble des trois types d'EnR ou sinon sur le type d'EnR qu'il souhaite évaluer. Au début de la simulation, l'utilisateur devra indiquer quel type d'EnR, il souhaite évaluer. Les figures ci-dessous présentent la page d'accueil de l'outil et du choix du type d'EnR que nous souhaitons traiter.

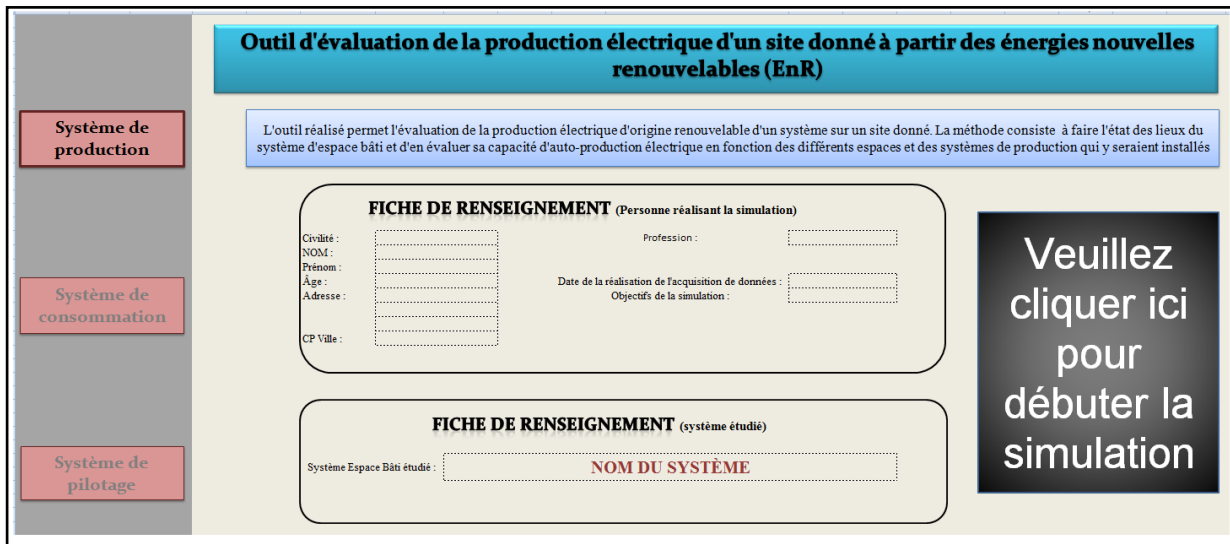


Figure 2.33 : Page d'accueil de l'outil d'évaluation de la production énergétique d'origine EnR
Auteur : El Assad

Sur cette Figure 2.33 représentant la page d'accueil, l'utilisateur devra indiquer plusieurs informations relatives au projet qu'il souhaite mener. Il est possible d'accéder aux autres pages d'accueil des outils de consommation et de pilotage de la distribution d'énergie du site d'étude. Ensuite, en cliquant sur l'onglet situé sur la droite, l'utilisateur arrivera sur la page de présentation du projet qu'il souhaite mener comme montrer sur la Figure 2.34 ci-dessous.

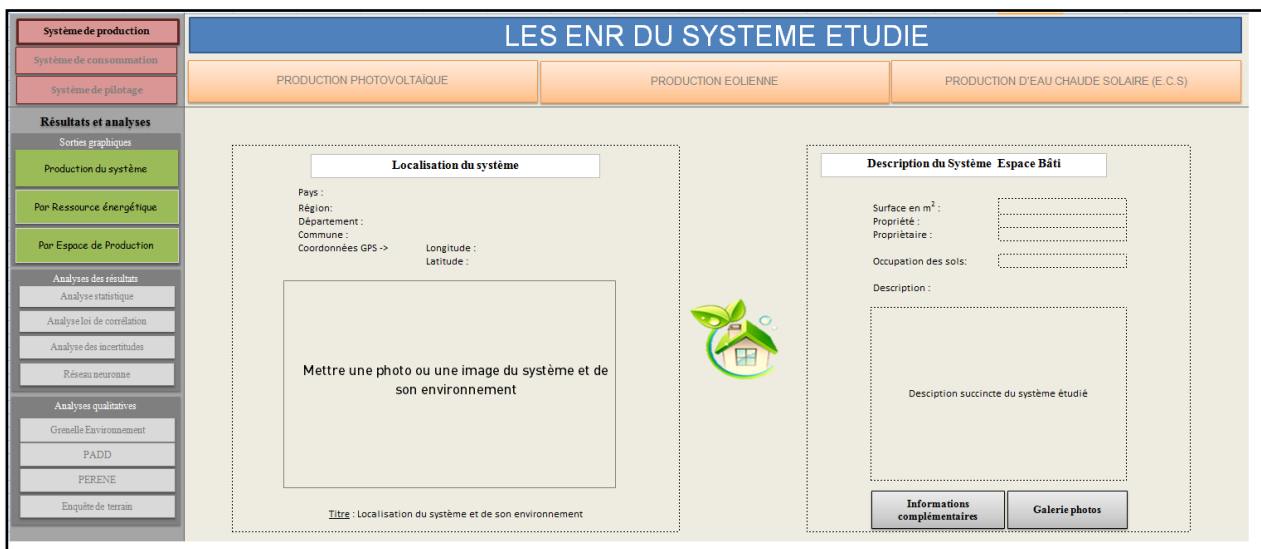


Figure 2.34 : Page présentation du projet et identification des EnR

Au niveau de cette Figure 2.34, l'utilisateur renseigne plusieurs informations relatives à son projet et identifie le ou les EnR qu'il souhaite étudier. À ce niveau, l'utilisateur peut visualiser l'ensemble des résultats de production énergétique de l'ensemble du site d'étude selon trois échelles d'observation :

- Par espace de production
- Par ressource énergétique
- Production totale d'EnR du système.

En fonction de son projet, quand il y a un clic sur l'un des liens situés sur le haut de la page, plus précisément sur la bande de navigation structurelle, nous accédons à la page de présentation du type d'EnR et d'acquisition de données dont nous allons maintenant présenter l'architecture pour chaque type d'EnR.

2.3.2 - Production photovoltaïque (PV)

L'évaluation de la production énergétique à partir des panneaux photovoltaïques s'effectue en alliant des données techniques, sur le type de module à disposition, et des données météorologiques du site d'étude au pas de temps horaires. Sur les outils réalisés, lorsque nous sommes en présence de cellules avec des couleurs claires, cela signifie que nous sommes en présence de cellules d'acquisition de données et lorsque nous sommes en présence de couleur plus foncée cela veut dire que nous sommes en présence d'une cellule de présentation de résultat d'un calcul.

Les modules photovoltaïques sont des systèmes qui à partir des rayons du soleil permettent de produire de l'électricité. Ce procédé repose sur la propriété des matériaux semi-conducteurs à générer de l'électricité à partir de l'énergie solaire ou rayonnement solaire.

La quantité d'énergie qui sera produite dépend de six facteurs, qui sont :

- Le rayonnement solaire;
- L'inclinaison des modules par rapport au soleil;
- Le rendement du module;
- La température ambiante;
- Surface du module (plus la surface du module sera grande plus la quantité des rayons captés sera élevée);
- Type de module.

Concernant ce dernier aspect sur le type de module, il existe trois principaux types de modules photovoltaïques. Nous avons des modules monocristallins, des modules polycristallins et des modules amorphes ou en couche-mince. Nous allons brièvement présenter, sur le Tableau 2.3 ci-dessous, les avantages et inconvénients pour chacun de ces modules.

Tableau 2.3 : Avantages et inconvénients des principaux modules photovoltaïques

	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS	ASPECTS ÉNERGÉTIQUES
MODULE MONOCRISTALLIN	<ul style="list-style-type: none"> - Très bon rendement (environ 150 Wc/m²) - Durée de vie importante (+/- 30 ans) 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé - Rendement faible sous un faible ensoleillement 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement module commercial : 12 à 20% - Rendement record en laboratoire : environ 25%
MODULE POLYCRISTALLIN	<ul style="list-style-type: none"> - Bon rendement (environ 100 Wc/m²) - Durée de vie importante (+/- 30ans) - Meilleur rapport qualité-prix 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement faible sous un faible ensoleillement 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement module commercial : 11 à 15% - Rendement record en laboratoire : environ 20%
MODULE AMORPHE OU EN COUCHE-MINCE	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionne avec un éclairage faible - Bon marché par rapport aux autres types de cellules - Moins sensible aux températures élevées 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m²), les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses. - Durée de vie courte (+/- 10 ans). Les performances diminuent sensiblement avec le temps. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement module commercial : 5 à 9% -Rendement record en laboratoire : environ 13,4%

Source : ecosources[60]

D'après le Tableau 2.3 ci-dessus, nous constatons que la meilleure solution pour l'installation d'un module photovoltaïque, avec comme critère le rendement, le prix et la durée de vie, sera l'installation d'un module photovoltaïque polycristallin. En effet, il présente le meilleur offre qualité/prix. C'est pour cela que pour l'ensemble de nos simulations qui seront menés, nous ferons toujours des estimations pour une production photovoltaïque polycristallin[61].

À présent, nous allons dans un premier temps réaliser la présentation des pages de description du projet. Puis, dans un second temps, nous verrons les équations et les pages d'acquisition de données et de résultats.

2.3.2.1 - Page présentation du système PV sur le site de production d'EnR

Cette page répond à plusieurs objectifs :

- Présenter le schéma synoptique du dispositif de production photovoltaïque

- Présenter les données décrivant le système de production
- Présenter des données complémentaires de description
- Cerner l'interaction entre le système de production d'EnR et le système de consommation
- Assurer une navigation interactive

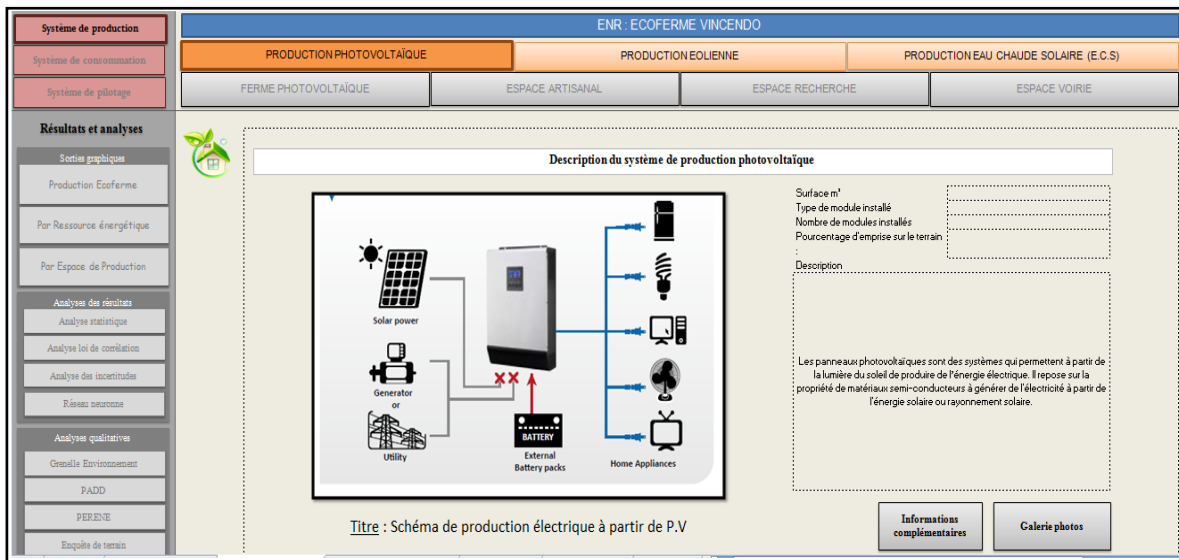


Figure 2.35 : Présentation générale système PV

Sur cette Figure 2.35, nous observons qu'il existe une image montrant le fonctionnement général du système de PV étudié. Ensuite, nous devons renseigner des informations générales sur le type de PV qui va être installé. Il est également possible de visualiser les résultats de sortie de PV sur l'ensemble des espaces bâtis qui dispose d'une installation de PV se trouvant sur le système d'étude. Concernant la page de description du système d'EnR installé, nous pouvons la visualiser sur la page représentée sur la Figure 2.36 ci-dessous.

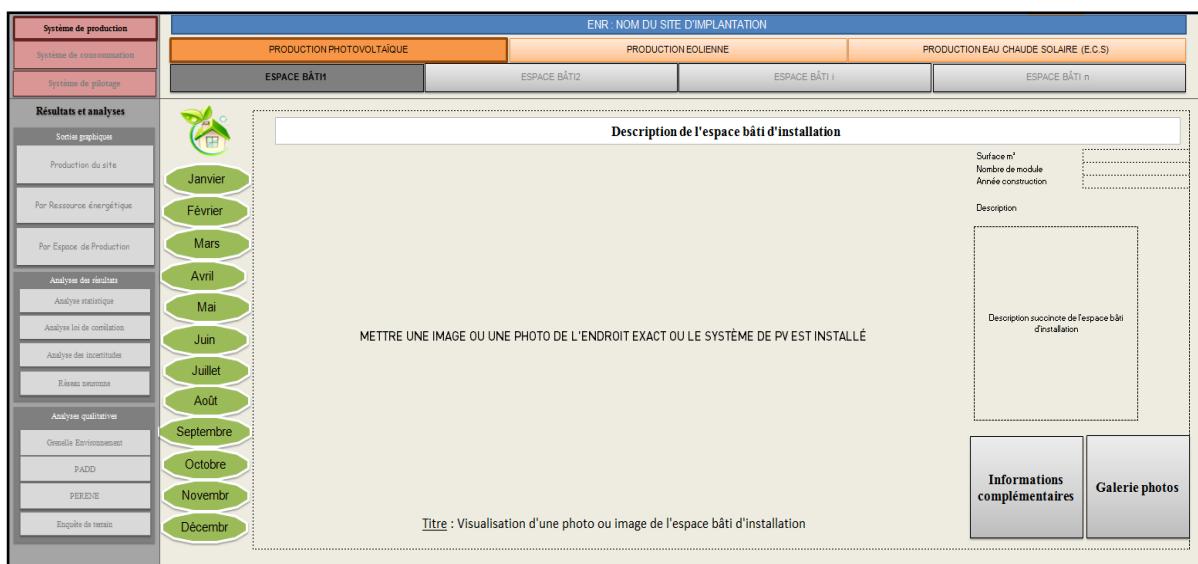


Figure 2.36 : Description détaillée du système de PV installé au niveau d'un espace bâti

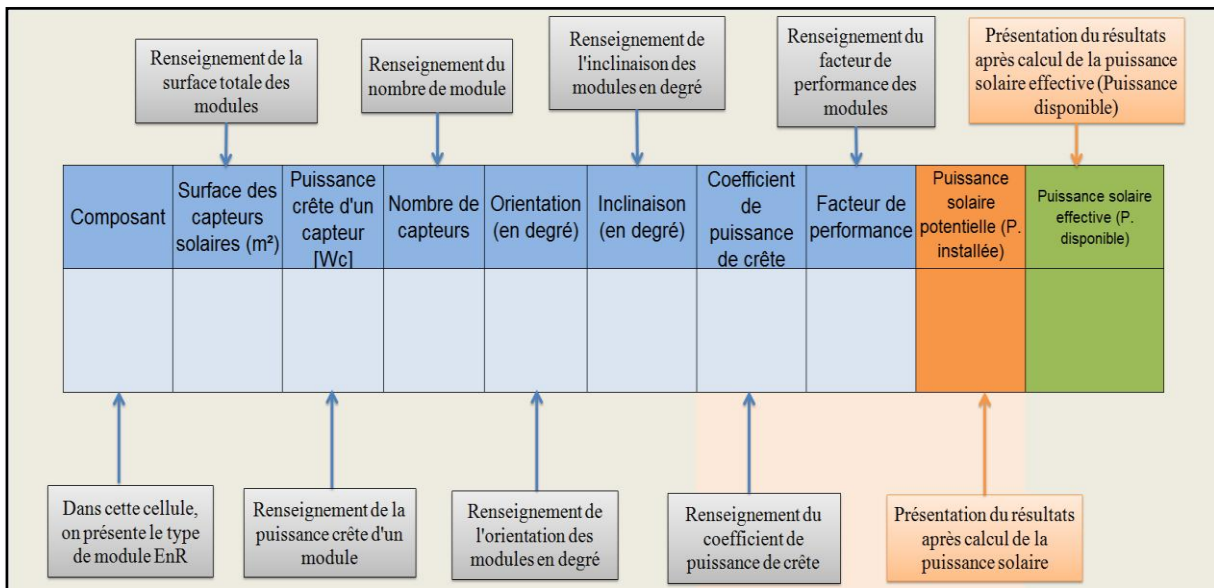
Sur cette Figure 2.36, nous devons renseigner des informations détaillées sur le type de PV étudié. Il est possible de pouvoir naviguer à partir de cette page sur les différentes pages d'acquisition de

données sur l'année du système de PV. Nous allons justement à présent, passer à la description architecturale des pages d'acquisition de données pour le système PV.

2.3.2.2 - Page d'acquisition de données et de résultats

Au niveau de l'acquisition de données de l'outil de production au niveau du PV, elle se déroule comme indiqué sur le Tableau 2.4 ci-dessous.

Tableau 2.4 : Page d'acquisition des données techniques du système PV



À la suite de l'acquisition de données au niveau de la page présentée sur le Tableau 2.4, nous passons à la phase de calcul en utilisant les équations données ci-dessous.

Dans les relations ci-dessous, les paramètres physiques indiqués sont les suivants :

- L_g : Latitude du site
- L_o : Longitude du site
- α : Angle d'inclinaison des capteurs solaires
- \bar{U} : Orientation des capteurs solaires
- N_j : Jour dans l'année
- N_h : Heure du jour N_j
- γ : Angle d'incidence du soleil selon le jour N_j
- Δt : Distance "soleil-capteurs"
- ω : Angle horaire

ε : Déclinaison (angle entre le plan de l'équateur de la terre et le plan de l'écliptique du soleil)

Y : Hauteur du soleil

A : Azimut du soleil (direction du soleil mesurée dans un plan horizontal, à partir du nord et dans le sens horlogique)

ν : Facteur direct (angle d'incidence du faisceau solaire sur une surface)

E_{dif} : Irradiation solaire diffuse du site

E_{dir} : Irradiation solaire direct du site

E_{tot} : Irradiation solaire total du site ($E_{dif} + E_{dir}$)

E_G : Irradiation solaire global sur les capteurs selon l'orientation et l'inclinaison

Nous rappelons que l'équation de base qui permet de calculer la production électrique à partir d'un PV est la suivante :

Équation 1 : Formule de base pour la production PV

$$P_{pv} [Wh] = E_G \left[\frac{Wh}{m^2} \right] * P_{cr} * S [m^2] * f_{perf}$$

Avec :

E_G : Irradiation solaire global sur les capteurs selon l'inclinaison et l'orientation

P_{cr} : Coefficient de puissance de crête des capteurs

S : Surface totale des capteurs

f_{perf} : Facteur de performance énergétique du système.

Nous avons:

$$E_G = E_{dir} * \nu + E_{dif} * \frac{1 + \cos(\alpha)}{2} + 0.2 * E_{tot} * \frac{1 - \cos(\alpha)}{2}$$

$$\nu = \sin Y * \cos \alpha + \cos Y * \cos(\tilde{U} - A) * \sin \alpha$$

$$Y = \sin^{-1}(\sin L_g * \sin \varepsilon + \cos L_g * \cos \varepsilon * \cos \omega)$$

$$A = \sin^{-1}\left(\frac{\cos \varepsilon * \sin \omega}{\cos Y}\right)$$

$$\varepsilon = 23,45 * \sin \frac{360 * (284 + N_j)}{365}$$

$$\omega = 15 * \left(-3 + \frac{L_o}{15} + \frac{\Delta t}{60} - 12\right)$$

$$\Delta t = 75.10^{-7} + 18,68.10^{-4} * \cos \gamma - 32,077.10^{-3} * \sin \gamma - 14,615.10^{-3} * \cos(2 * \gamma) - 40,89.10^{-3} * \sin(2 * \gamma) * 229,2$$

$$\gamma = (N_j - 1) * \frac{360}{365}$$

L'Équation 1 devient alors :

Équation 2 : Formule développée pour la production PV

$$P_{pv} [Wh] = E_{dir} * v + E_{dif} * \frac{1 + \cos(\alpha)}{2} + 0.2 * E_{tot} * \frac{1 - \cos(\alpha)}{2} * P_{cr} * S * f_{perf}$$

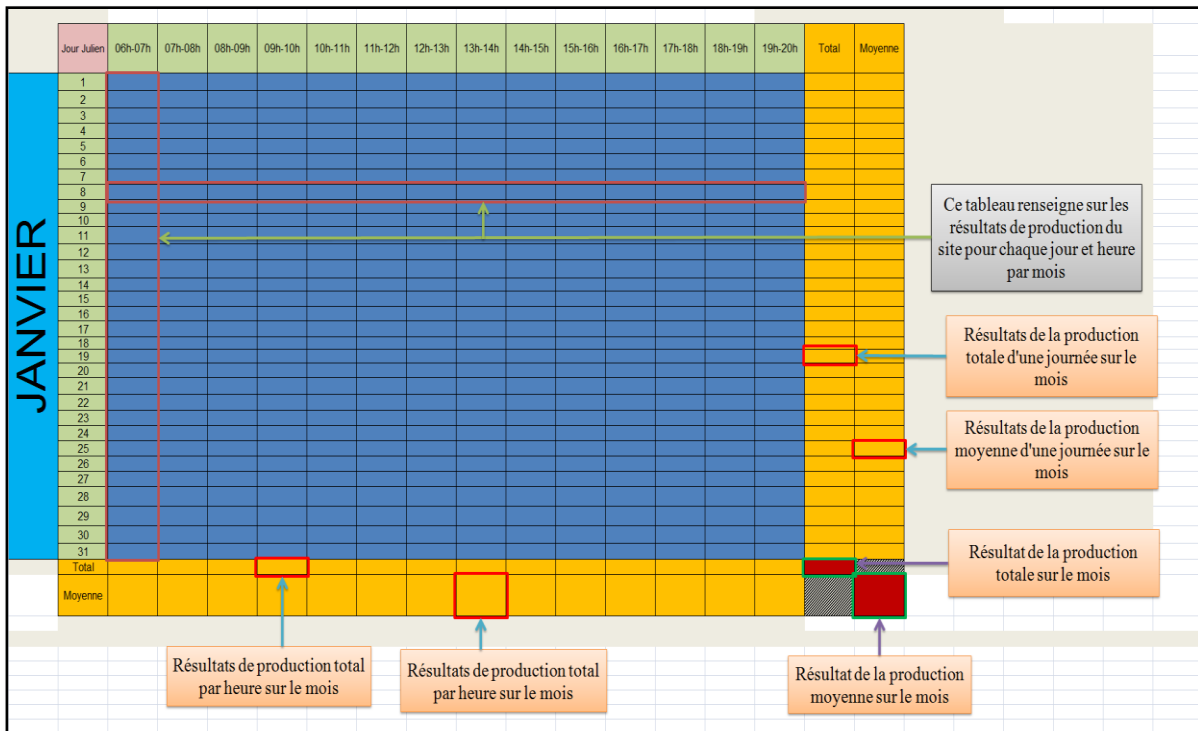
Nous donnons ci-dessous une page montrant un exemple d'acquisition de données météorologiques d'un site d'étude pour un mois de janvier. Les pages sont construites de la même manière sur l'ensemble des mois de l'année.

Tableau 2.5 : Page d'acquisition des données météorologiques du site d'étude

Jour Julien	06h-07h	07h-08h	08h-09h	09h-10h	10h-11h	11h-12h	12h-13h	13h-14h	14h-15h	15h-16h	16h-17h	17h-18h	18h-19h	19h-20h	Moyenne	Valeur moyenne mensuelle
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																
27																
28																
29																
30																
31																
Moyenne																
Valeur moyenne mensuelle																

À la suite de l'acquisition de l'ensemble des données, on obtient un tableau de résultat sous la forme présentée ci-dessous.

Tableau 2.6 : Présentation des résultats sur la production EnR d'origine PV [kWh]



2.3.3 - Production éolienne

L'évaluation de la production énergétique à partir des éoliennes s'effectue en alliant des données techniques, sur le type d'éolien à disposition, et des données météorologiques du site d'étude au pas de temps horaires. Nous distinguons deux genres d'éoliennes, il y a les éoliennes on-shore (les éoliennes sur le continent) et les éoliennes off-shore (les éoliennes sur la mer). Il existe sur ces deux genres d'éoliennes, plusieurs types d'éoliennes qui sont :

- Les éoliennes à axe horizontal
- Les éoliennes à axe vertical
- Les éoliennes domestiques
- Les hydroliennes

Les avantages et inconvénients d'une éolienne sont répertoriés sur le Tableau 2.7 ci-dessous.

Tableau 2.7 : Avantages et inconvénients d'une éolienne

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Forme d'énergie durable et propre. Elle ne produit aucun rejet, émission ou déchet - Énergie ne nécessitant aucun carburant - Après son temps de fonctionnement (environ 20 ans), une éolienne est entièrement démontable et recyclable. La fondation en béton peut elle aussi être retirée - L'éolienne n'aura laissé aucun produit contaminant autour d'elle et pourra facilement être remplacée - L'énergie éolienne est modulable et peut-être adaptée aux besoins en énergie - Techniquement au point, les éoliennes sont rentables dans les régions bien ventées ou selon le type d'utilisation qui va en être fait - Une installation optimisée d'une éolienne peut vous faire baisser votre facture d'électricité - Possibilité de revendre le surplus de courant à EDF <ul style="list-style-type: none"> - Les éoliennes permettent l'électrification en site isolé 	<ul style="list-style-type: none"> - La production d'énergie à lieu en fonction du vent - Dans le cas d'installation pour une autoconsommation, il est nécessaire de recourir au stockage par des batteries pour faire face aux périodes de vent faible, ce qui augmente le coût - Bien qu'elles soient de plus en plus silencieuses, certains estiment que les éoliennes émettent des nuisances sonores - Crainte de la dégradation de l'aspect visuel du paysage - Risque très faible de collision des animaux volants avec les pales

Source : consoneo

Pour notre part, nous nous intéressons particulièrement aux éoliennes on-shore, c'est-à-dire situé sur la terre ferme. Nous allons maintenant voir comment nous avons réalisé l'outil d'évaluation de la production éolienne sur un site donné.

2.3.3.1 - Page présentation du projet et du type d'EnR étudié

Sur cette section, nous allons réaliser la description des pages de projet et de description du système EnR utilisé sur le projet.

Étant donné, que nous parlons ici d'éolienne, en cliquant sur l'onglet Éolienne présenté sur la Figure 2.34, nous arrivons sur la page présentée ci-dessous.

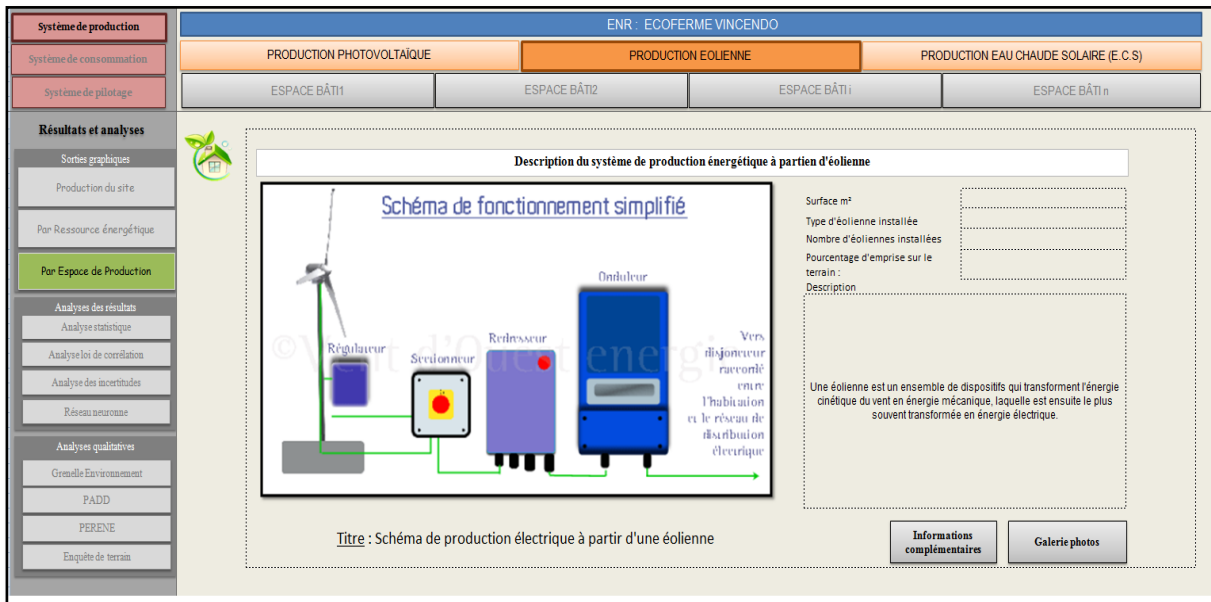


Figure 2.37 : Présentation générale système Éolienne

La description est la même que pour le système PV.

Pour la page de description du système d'EnR installé, on visualise la page représentée sur la Figure 2.38 ci-dessous.

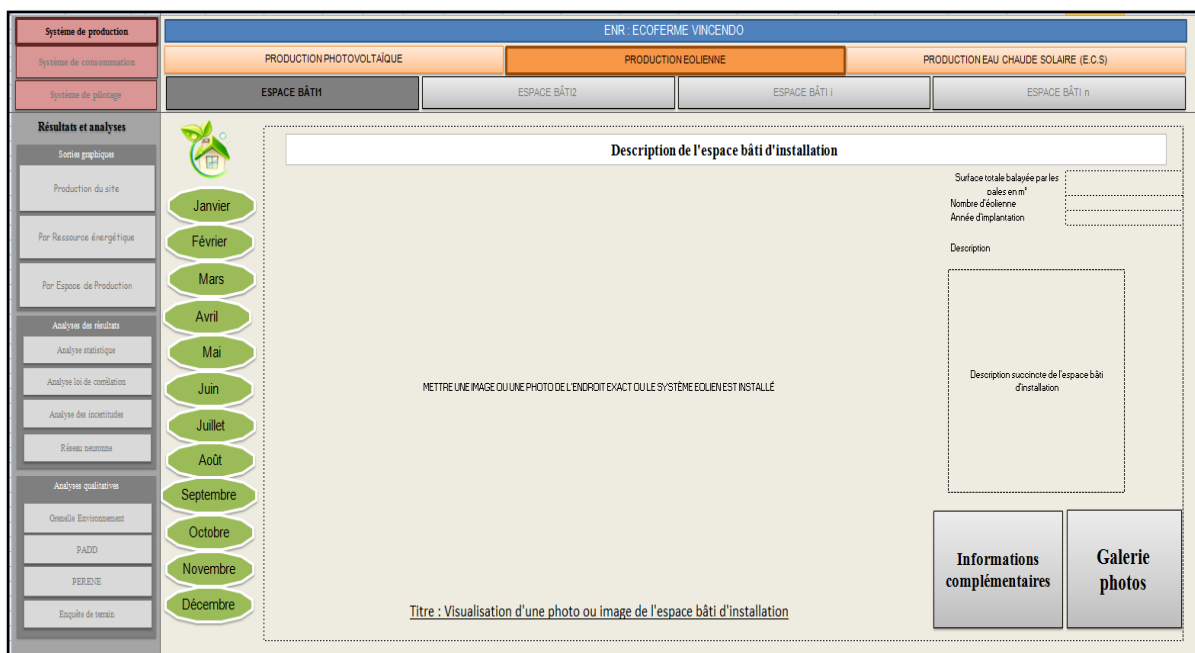


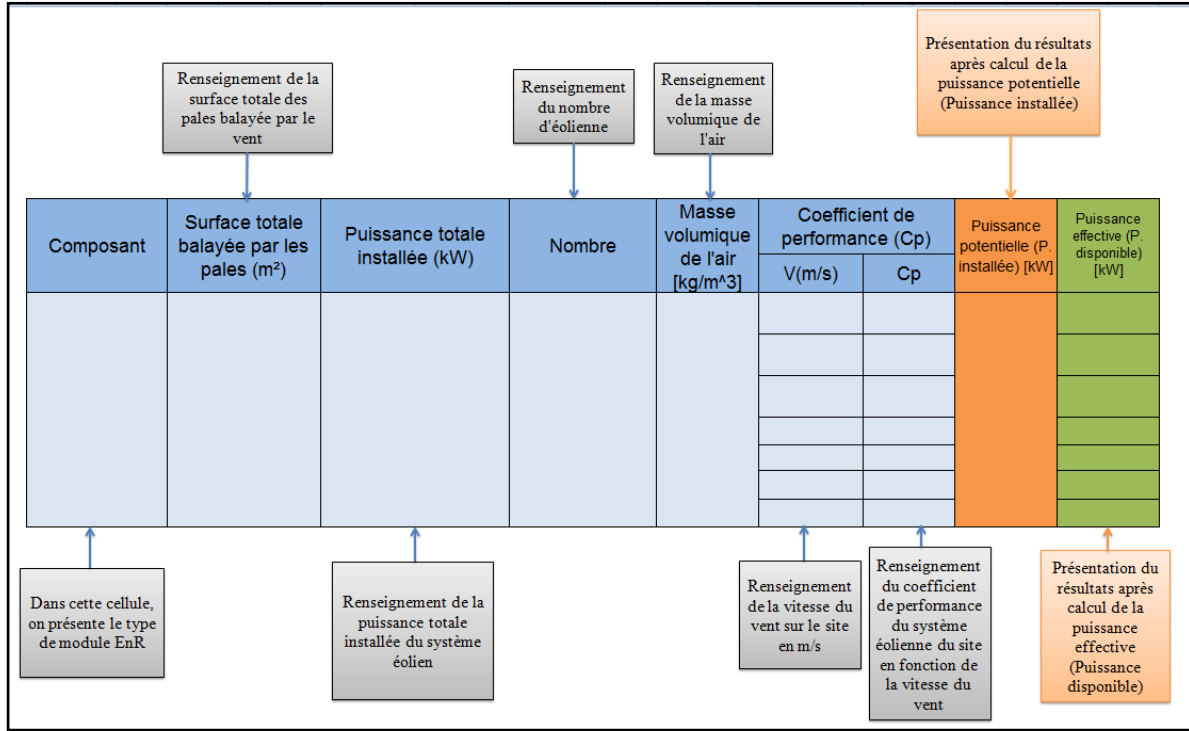
Figure 2.38 : Description détaillée du système éolienne installé au niveau d'un espace bâti

La description est la même que pour le PV. En cliquant sur l'un des onglets mois, nous arrivons à une page d'acquisition de données selon le mois pour la production éolienne. Nous présentons les tableaux d'acquisition de données sur la section suivante.

2.3.3.1 - Page d'acquisition de données et de résultats

Au niveau de l'acquisition de données de l'outil de production au niveau d'une éolienne, elle se déroule comme indiqué sur le Tableau 2.8 ci-dessous.

Tableau 2.8 : Page d'acquisition des données techniques du système éolienne



À la suite de l'acquisition de données au niveau de la page présentée sur le Tableau 2.8, nous passons à la phase de calcul en utilisant l'équation de la formule de Betz sur la puissance maximum récupérable donnée ci-dessous.

Équation 3 : Détermination de la production énergétique d'origine éolienne

$$P [kWh] = \frac{1}{2} * \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] * S [m^2] * V^3 \left[\frac{m}{s} \right] * C_p$$

Avec :

P : Puissance maximum susceptible d'être récupérée

ρ : Masse volumique de l'air

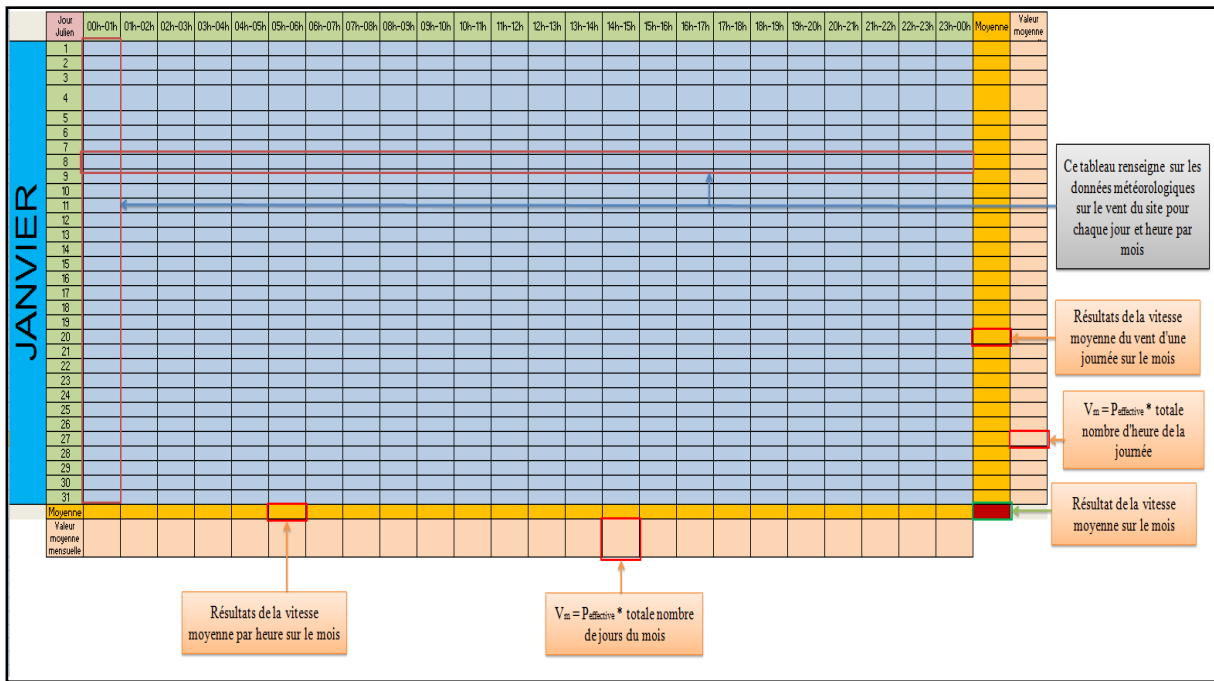
S : Surface totale des pales balayées par le vent

V : Vitesse du vent sur le site

Cp : Coefficient de performance de l'éolienne

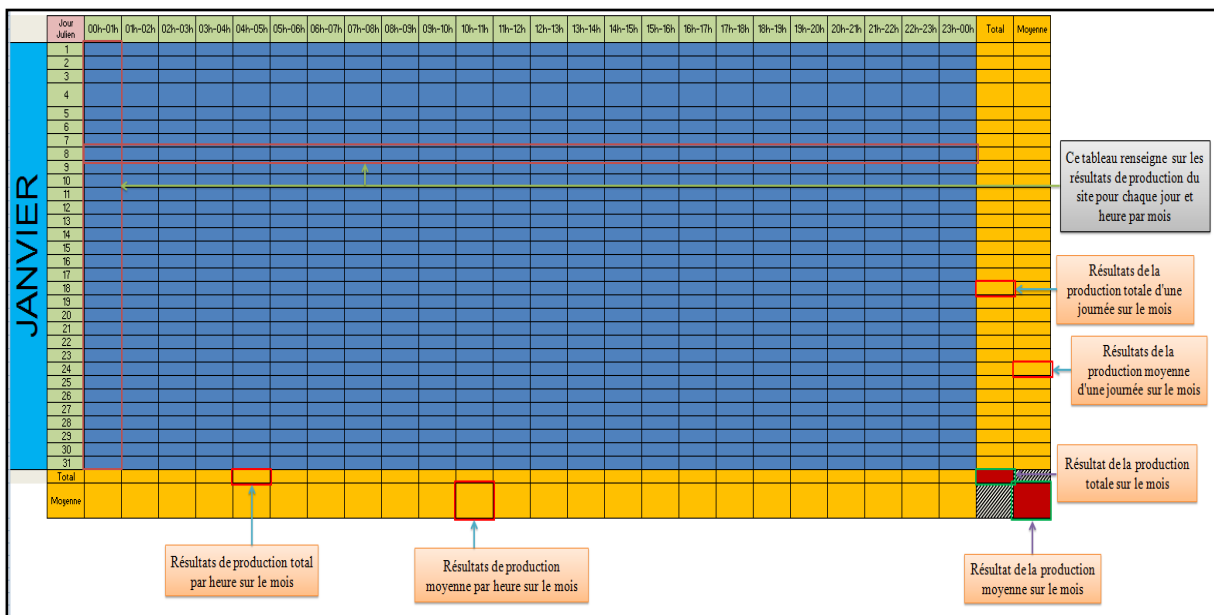
Nous donnons ci-dessous une page montrant un exemple d'acquisition de données météorologiques d'un site d'étude pour un mois de janvier. Les pages sont construites de la même façon sur l'ensemble des mois de l'année.

Tableau 2.9 : Page d'acquisition des données météorologiques du site d'étude



Après avoir fait l'acquisition de l'ensemble des données, on obtient après calcul, les résultats présentés sur le tableau ci-dessous.

Tableau 2.10 : Présentation des résultats sur la production EnR d'origine éolienne [kWh]



Nous avons vu comment procéder à l'évaluation de la production énergétique d'origine renouvelable d'un système de PV et d'un système éolien. Pour les deux systèmes, il est primordial de disposer d'une base de données météorologique à l'échelle horaire.

2.4 - OUTIL DE PILOTAGE de la DISTRIBUTION D'EnR

2.4.1 - Principe

Le pilotage de la distribution de l'énergie consiste à connaître pour chaque tranche horaire des jours de l'année la situation des différents systèmes[62] [63] [64].

Nous considérons quatre systèmes à savoir :

- SP : le système de production d'énergie renouvelable ;
- SC : le système de consommation ;
- STO : le système de stockage cumulé ;
- RES : le système de consommation réseau cumulé.

Les états suivants des différents systèmes :

- SC_i : état du système de consommation à l'instant *i*;
- SP_i : état du système de production à l'instant *i*;
- STO_i : état du système de stockage à l'instant *i*;
- STO_{i-1} : état du système de stockage à l'instant *i-1*;
- RES_i : état de la consommation effectuée au réseau à l'instant *i*;
- EXC_i : état d'éventuel excédent à l'instant *i*.

Et les paramètres de fonctionnement suivants

- LH : limite haute de la capacité de stockage;
- LB : limite basse de la capacité de stockage;
- LR : limite de la consommation pouvant être effectuée sur le réseau;
- Capacité de stockage.

Dans l'outil, chaque système est identique et est représenté par un tableau constitué de 24 colonnes (pour chaque tranche horaire du jour) et de 28, 30, ou 31 lignes selon le nombre du jour du mois considéré.

La Figure 2.39 nous donne un aperçu des différents systèmes.

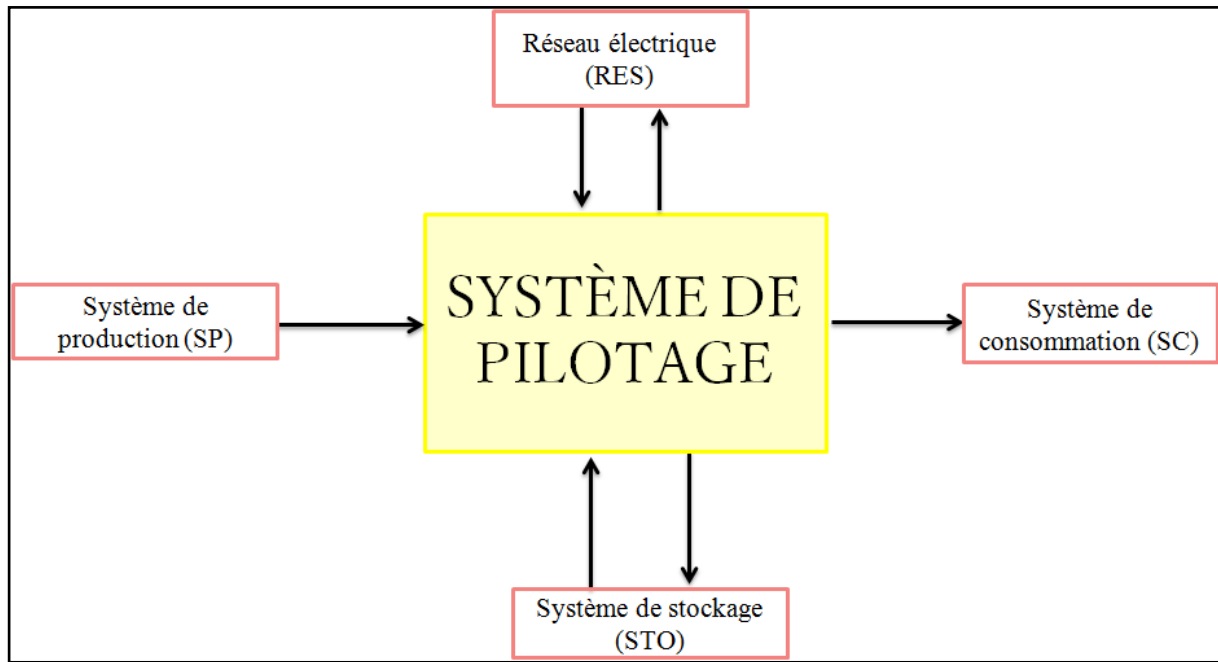


Figure 2.39 : Illustration des différents systèmes à piloter

Le schéma de la Figure 2.39 peut être illustré par la Figure 2.40.

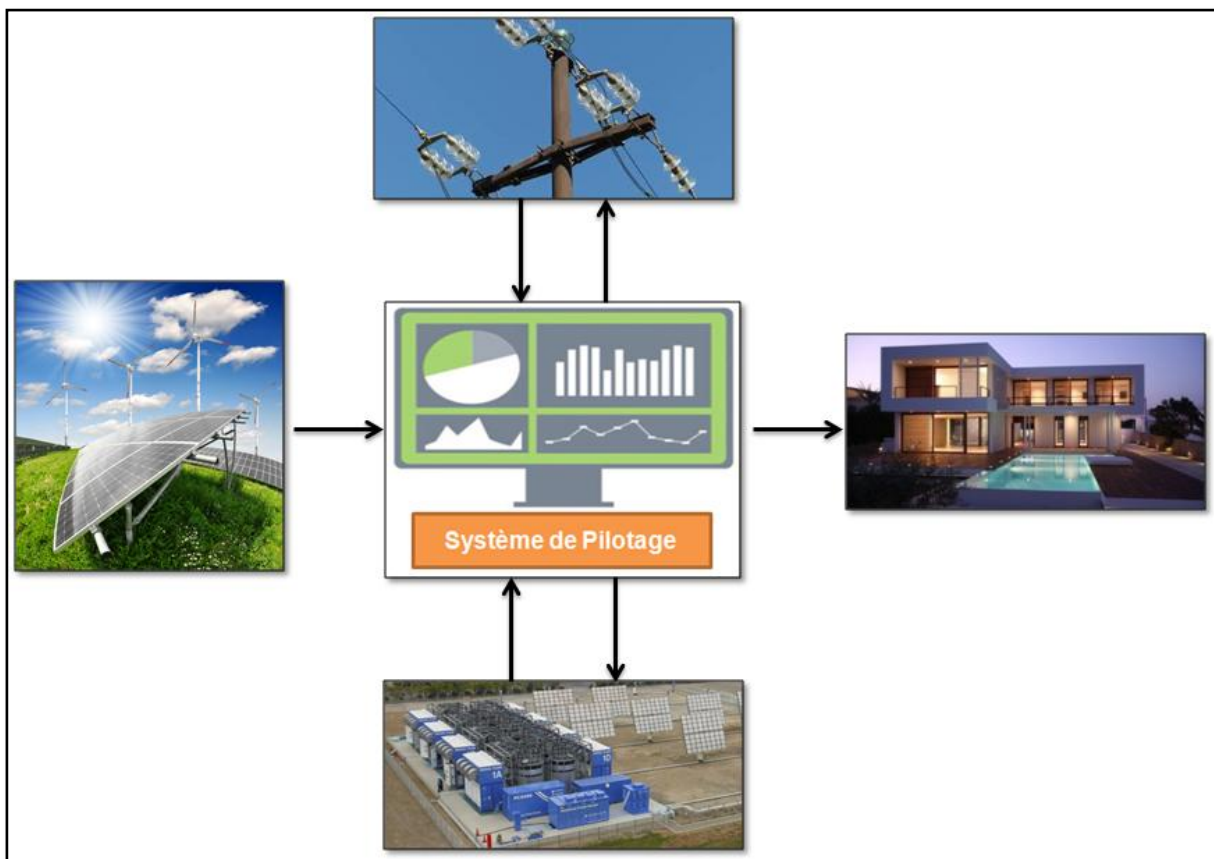


Figure 2.40 : Illustration du fichier de pilotage

Nous pouvons définir plusieurs scénarios pour le pilotage de l'énergie électrique d'origine photovoltaïque d'un système d'espace bâti.

Dans tous les cas, pour les scénarios qui vont suivre, le système de production "SP" et le système de consommation "SC" restent invariants.

Nous allons nous concentrer sur l'évolution du stockage cumulé (STO) et la consommation au niveau du réseau (RES). Nous définissons une variable D pour chaque tranche horaire telle que :

$$D = SP_i - SC_i$$

Nous définissons une dernière variable relative au système qui gère les excédents d'énergie : EXC.

Il existe deux grands types de scénarios que nous pouvons considérer :

- Le scénario SANS STOCKAGE ;
- Le scénario AVEC STOCKAGE.

Scénario 1 : SANS STOCKAGE

Ce scénario ne considère pas le système de stockage d'énergie (STO). C'est le scénario le plus simple. Nous allons considérer quatre cas :

- Cas 1 : il n'y a pas de production d'énergie électrique d'origine photovoltaïque ($SP = 0$)

Puisqu'il n'y a pas de système de stockage, lorsqu'il n'y a pas du tout de production d'énergie au niveau du SP, le système de consommation sera alimenté par le réseau. Nous avons :

$$SP = 0 \rightarrow RES = SC \rightarrow EXC = 0$$

- Cas 2 : la production est égale à la consommation ($D = 0$).

Pour ce cas, il y a une production au niveau du SP mais cela est égal à la consommation. Le SC puisera donc de l'énergie sur le système de production pour une tranche horaire donnée.

$$D = 0 \rightarrow RES = 0 \rightarrow EXC = 0$$

- Cas 3 : la production est supérieure à la consommation ($D > 0$)

Dans le cas où la production est supérieure à la consommation, le SC va être alimenté par le SP pour une tranche horaire donnée. Nous avons également un surplus d'énergie que nous pourrions utiliser pour alimenter d'autres espaces bâtis pour la même tranche horaire.

$$D > 0 \rightarrow RES = 0 \rightarrow EXC = D$$

- Cas 4 : la production est inférieure à la consommation ($D < 0$)

Pour le quatrième et dernier cas, lorsque la production est inférieure à la consommation, il y a une partie de la consommation qui sera alimentée par le SP et une partie sera alimentée par le RES.

$$D < 0 \rightarrow RES = SC \square SP \rightarrow EXC = 0$$

Scénario 2 : AVEC STOCKAGE

Comme pour le scénario sans stockage, il y a quatre cas à étudier :

- Cas 1 : il n'y a pas de production d'énergie électrique d'origine photovoltaïque ($SP = 0$)

Lorsqu'il n'y a pas du tout de production d'énergie électrique, la consommation se fait en priorité au niveau du système de stockage. Nous définissons une limite basse (LB) à laquelle nous ne pouvons pas descendre. La seule source d'énergie du système d'espace bâti sera le système de stockage jusqu'à ce que la LB ne soit atteinte.

$$\begin{aligned} \text{SPi} = 0 \text{ et } (\text{STOi} - \text{SCi}) \geq \text{LB} \text{ Alors } \quad & \text{STOi} = \text{STOi-1} - \text{SCi} \\ & \text{RESi} = 0 \\ & \text{EXCi} = 0 \end{aligned}$$

Au moment où la limite basse (LB) est atteinte, le système de consommation (SC) sera alimenté par le réseau.

$$\begin{aligned} \text{SPi} = 0 \text{ et } (\text{STOi} - \text{SCi}) < \text{LB} \text{ Alors } \quad & \text{STOi} = \text{LB} \\ & \text{RESi} = \text{SCi} - (\text{STOi-1} - \text{LB}) \\ & \text{EXCi} = 0 \end{aligned}$$

- Cas 2 : la production est égale à la consommation ($D = 0$)

Dans ce cas-là, la consommation est égale à la production. Ce sera donc le système de production qui va assurer l'alimentation du système de production pour une tranche horaire donnée.

$$\begin{aligned} \text{STOi} &= \text{STOi-1} \\ \text{RESi} &= 0 \\ \text{EXCi} &= 0 \end{aligned}$$

- Cas 3 : la production est supérieure à la consommation ($D > 0$)

Lorsque $D > 0$, cela veut dire que le système de consommation est inférieur au système de production. Le système de production assure donc l'alimentation du système de consommation pour une tranche horaire donnée. De plus, nous avons un excédent d'énergie pour charger la batterie de stockage en premier lieu.

$$\begin{aligned} \text{Si } D > 0 \text{ et si } (\text{STOi-1} + (\text{SPi} - \text{SCi})) \leq \text{LH} \text{ Alors } \quad & \text{STOi} = \text{STOi-1} + (\text{SPi} - \text{SCi}) \\ & \text{RESi} = 0 \\ & \text{EXCi} = 0 \end{aligned}$$

Au moment où la limite haute (LH) du système de stockage est atteinte, le reste d'énergie non consommé par le système de consommation constituera un excédent. Ce dernier sera soit injecté vers le réseau soit distribué vers les autres espaces bâtis du système d'espace bâti.

$$\begin{aligned} \text{Si } D > 0 \text{ et si } (\text{STOi-1} + (\text{SPi} - \text{SCi})) > \text{LH} \text{ Alors } \quad & \text{STOi} = \text{LH} \\ & \text{RESi} = 0 \\ & \text{EXCi} = (\text{SPi} - \text{SCi}) - (\text{LH} - \text{STOi-1}) \end{aligned}$$

- Cas 4 : la production est inférieure à la consommation ($D < 0$)

Pour le cas où la production est inférieure à la consommation, le système de consommation va être alimenté à la fois par le système de production et par le système de stockage jusqu'à ce que la limite basse (LB) ne soit atteinte.

$$\begin{aligned} \text{Si } D < 0 \text{ et si } (\text{STOi-1} - (\text{SCi} - \text{SPi})) \geq \text{LB} \text{ Alors } \quad & \text{STOi} = \text{STOi-1} - (\text{SCi} - \text{SPi}) \\ & \text{RESi} = 0 \\ & \text{EXCi} = 0 \end{aligned}$$

Si le niveau du système de stockage atteint la limite basse considérée, alors, le système de consommation sera alimenté entièrement par le réseau.

$$\begin{aligned} \text{Si } D < 0 \text{ et si } (\text{STO}_{i-1} - (\text{SC}_i - \text{SP}_i)) < \text{LB} \text{ Alors } \text{STO}_i &= \text{STO}_{i-1} - \text{LB} \\ \text{RES}_i &= (\text{SC}_i - \text{SP}_i) - (\text{STO}_{i-1} - \text{LB}) \\ \text{EXC}_i &= 0 \end{aligned}$$

Ces scénarios de stockage peuvent intégrer d'autres conditions pour mieux gérer le pilotage

▪ **Cas 1 : $\text{SC}_i \leq \text{LR}$**

Au cas où la consommation est inférieure ou égale à la limite réseau LR, cette consommation est à soustraire au niveau du réseau et la production sert à charger le système de stockage STO

1-1 $\text{SC}_i \leq \text{LR}$ et $\text{SP}_i = 0$

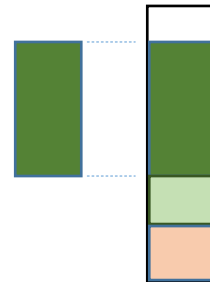
Si la consommation est inférieure ou égale à la limite réseau LR, et qu'il n'y a aucune production, la consommation est à réaliser au niveau du réseau. L'état de chaque système est donné par :

$$\begin{aligned} \text{RES}_i &= \text{SC}_i \\ \text{STO}_i &= \text{STO}_{i-1} \\ \text{EXC}_i &= 0 \end{aligned}$$

1-2 $\text{SC}_i \leq \text{LR}$ et $\text{SP}_i > 0$ et $\text{STO}_{i-1} + \text{SP}_i \leq \text{LH}$

Si la consommation est inférieure ou égale à la limite réseau LR, la consommation est toujours à réaliser au niveau du réseau. S'il y a une production d'EnR et que la capacité de stockage du système STO permet de récupérer en totalité cette production, la production sert alors à charger le système de STO. L'état de chaque système est donné par :

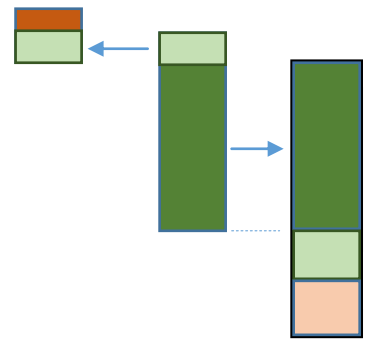
$$\begin{aligned} \text{RES}_i &= \text{SC}_i \\ \text{STO}_i &= \text{STO}_{i-1} + \text{SP}_i \\ \text{EXC}_i &= 0 \end{aligned}$$



1-3 $\text{SC}_i \leq \text{LR}$ et $\text{SP}_i > 0$ et $\text{STO}_{i-1} + \text{SP}_i > \text{LH}$ et $\text{SC}_i \geq \text{SP}_i - (\text{LH} - \text{STO}_{i-1})$

Si la consommation est inférieure ou égale à la limite réseau LR, la consommation est toujours à réaliser au niveau du réseau. S'il y a une production d'EnR et que la capacité de stockage du système STO ne permet plus de récupérer en totalité cette production, c'est-à-dire que la limite haute du système de stockage est atteinte, le surplus de production est utilisé par le système de consommation si la consommation en question est supérieure ou égale au surplus de production

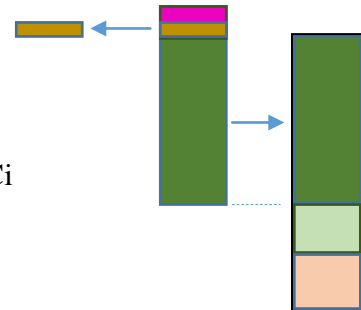
$$\begin{aligned} \text{RES}_i &= \text{SC}_i - (\text{SP}_i - (\text{LH} - \text{STO}_{i-1})) \\ \text{STO}_i &= \text{LH} \\ \text{EXC}_i &= 0 \end{aligned}$$



1-4 $\text{SC}_i \leq \text{LR}$ et $\text{SP}_i > 0$ et $\text{STO}_{i-1} + \text{SP}_i > \text{LH}$ et $\text{SC}_i < \text{SP}_i - (\text{LH} - \text{STO}_{i-1})$

Si le surplus de production devient supérieur à la consommation, il n'y aura plus de consommation au niveau du réseau. Le système de stockage atteignant la charge maximale, le surplus de production devient alors excédant qui sera à distribuer aux autres bâtiments du système espace bâtis ou à injecter vers le réseau.

$$\begin{aligned} \text{RES}_i &= 0 \\ \text{STO}_i &= \text{LH} \\ \text{EXC}_i &= \text{SP}_i - (\text{LH} - \text{STO}_{i-1}) - \text{SC}_i \end{aligned}$$



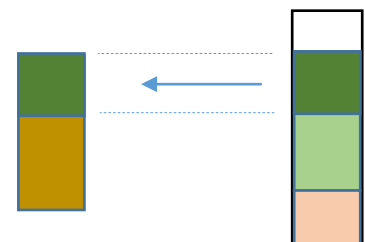
▪ **Cas 2 : $\text{SC}_i > \text{LR}$**

Au cas où la consommation est supérieure à la limite réseau imposée, on soutire toujours au moins au réseau à hauteur de cette limite.

2-1 $\text{SC}_i > \text{LR}$ et $\text{SP}_i = 0$ et $\text{SC}_i - \text{LR} < \text{STO}_{i-1} - \text{LB}$

S'il n'y a pas de production d'EnR, le surplus de consommation non réalisé au réseau est à réaliser au niveau du système de stockage si la capacité de celui-ci est suffisante.

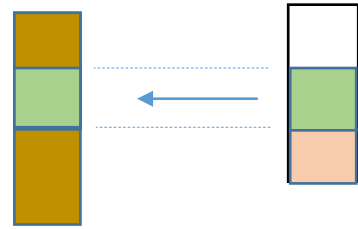
$$\begin{aligned} \text{RES}_i &= \text{LR} \\ \text{STO}_i &= \text{STO}_{i-1} - (\text{SC}_i - \text{LR}) \\ \text{EXC}_i &= 0 \end{aligned}$$



2-2 $\text{SC}_i > \text{LR}$ et $\text{SP}_i = 0$ et $\text{SC}_i - \text{LR} \geq \text{STO}_{i-1} - \text{LB}$

S'il n'y a pas de production d'EnR et le surplus de consommation non réalisé au réseau est supérieur à la capacité restante du système de stockage, la consommation à réaliser au niveau du réseau va au-delà de la limite réseau LR.

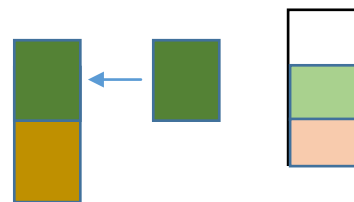
$$\begin{aligned}
 \text{RES}_i &= \text{SC}_i - (\text{STO}_{i-1} - \text{LB}) \\
 \text{STO}_i &= \text{LB} \\
 \text{EXC}_i &= 0
 \end{aligned}$$



2-3 $\text{SC}_i > \text{LR}$ et $\text{SP}_i > 0$ et $\text{SC}_i - \text{LR} = \text{SP}_i$

S'il y a une production d'EnR suffisante pour supporter le surplus de consommation non réalisé sur le réseau alors le système de stockage reste à son état à l'instant $i-1$.

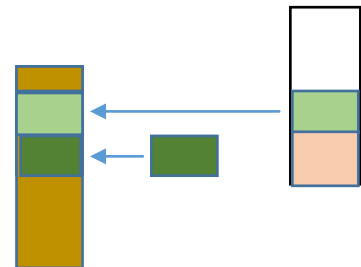
$$\begin{aligned}
 \text{RES}_i &= \text{LR} \\
 \text{STO}_i &= \text{STO}_{i-1} \\
 \text{EXC}_i &= 0
 \end{aligned}$$



2-4 $\text{SC}_i > \text{LR}$ et $\text{SP}_i > 0$ et $\text{SC}_i - \text{LR} > \text{SP}_i$ et $\text{STO}_{i-1} - \text{LB} < \text{SC}_i - \text{LR} - \text{SP}_i$

Si la production d'EnR est inférieure au surplus de consommation non réalisé au réseau alors une partie de la consommation est assurée par la production d'EnR. Une autre partie est assurée par l'énergie restante au niveau du système de stockage. La consommation restante reste à soutirer au réseau.

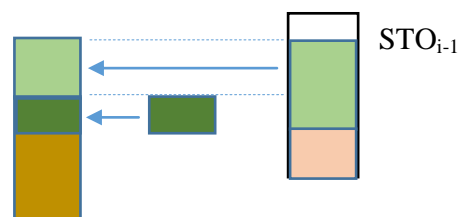
$$\begin{aligned}
 \text{RES}_i &= \text{SC}_i - \text{SP}_i - (\text{STO}_{i-1} - \text{LB}) \\
 \text{STO}_i &= \text{LB} \\
 \text{EXC}_i &= 0
 \end{aligned}$$



2-5 $\text{SC}_i > \text{LR}$ et $\text{SP}_i > 0$ et $\text{SC}_i - \text{LR} > \text{SP}_i$ et $\text{STO}_{i-1} - \text{LB} \geq \text{SC}_i - \text{LR} - \text{SP}_i$

Si la capacité de stockage est supérieure au surplus de consommation non satisfaite par la production d'EnR alors une partie de la consommation correspondante à LR est réalisée au niveau du réseau, une autre partie réalisée au niveau de la production d'EnR, la partie restante au niveau du système de stockage

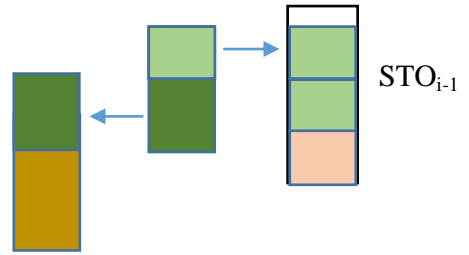
$$\begin{aligned}
 \text{RES}_i &= \text{LR} \\
 \text{STO}_i &= \text{STO}_{i-1} - (\text{SC}_i - \text{LR} - \text{SP}_i) \\
 \text{EXC}_i &= 0
 \end{aligned}$$



2-6 $SC_i > LR$ et $SP_i > 0$ et $SC_i - LR < SP_i$ et $SP_i - (SC_i - LR) \leq LH - STO_{i-1}$

Si le surplus de consommation non soutiré au réseau est inférieur à la production d'EnR alors une partie de cette production est utilisée pour satisfaire la consommation. Une autre partie de la production est utilisée pour charger le système de stockage.

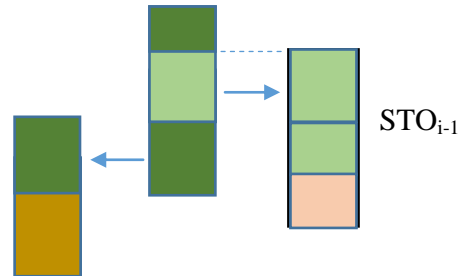
$$\begin{aligned} RES_i &= LR \\ STO_i &= STO_{i-1} + SP_i - (SC_i - LR) \\ EXC_i &= 0 \end{aligned}$$



2-7 $SC_i > LR$ et $SP_i > 0$ et $SC_i - LR < SP_i$ et $SP_i - (SC_i - LR) > LH - STO_{i-1}$ et $LR \geq SP_i - (SC_i - LR) - (LH - STO_{i-1})$

Si le système de stockage est plein et qu'il reste encore un partie de production, celle-ci va être utilisée pour diminuer le soutirage réseau.

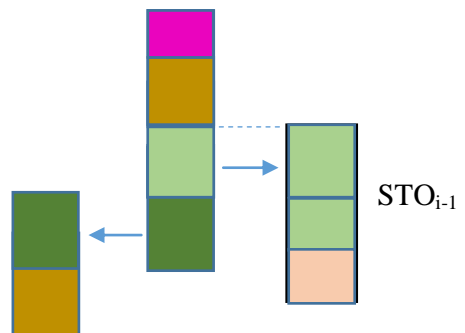
$$\begin{aligned} RES_i &= LR - (SP_i - (SC_i - LR) - (LH - STO_{i-1})) \\ STO_i &= LH \\ EXC_i &= 0 \end{aligned}$$



2-8 $SC_i > LR$ et $SP_i > 0$ et $SC_i - LR < SP_i$ et $SP_i - (SC_i - LR) > LH - STO_{i-1}$ et $LR < SP_i - (SC_i - LR) - (LH - STO_{i-1})$

La consommation au niveau du réseau devient 0 dans le cas où la production permet en même temps de charger le système de stockage et d'assurer entièrement la consommation. Il y aura même d'excédent d'énergie dans la meilleure condition de production.

$$\begin{aligned} RES_i &= 0 \\ STO_i &= LH \\ EXC_i &= SP_i - ((SC_i - LR) - (LH - STO_{i-1}) - LR) \end{aligned}$$



2.4.2 - Mise en œuvre

L'outil de pilotage entre la consommation énergétique et la production énergétique doit veiller à respecter les informations données sur la Figure 2.41 ci-dessous.

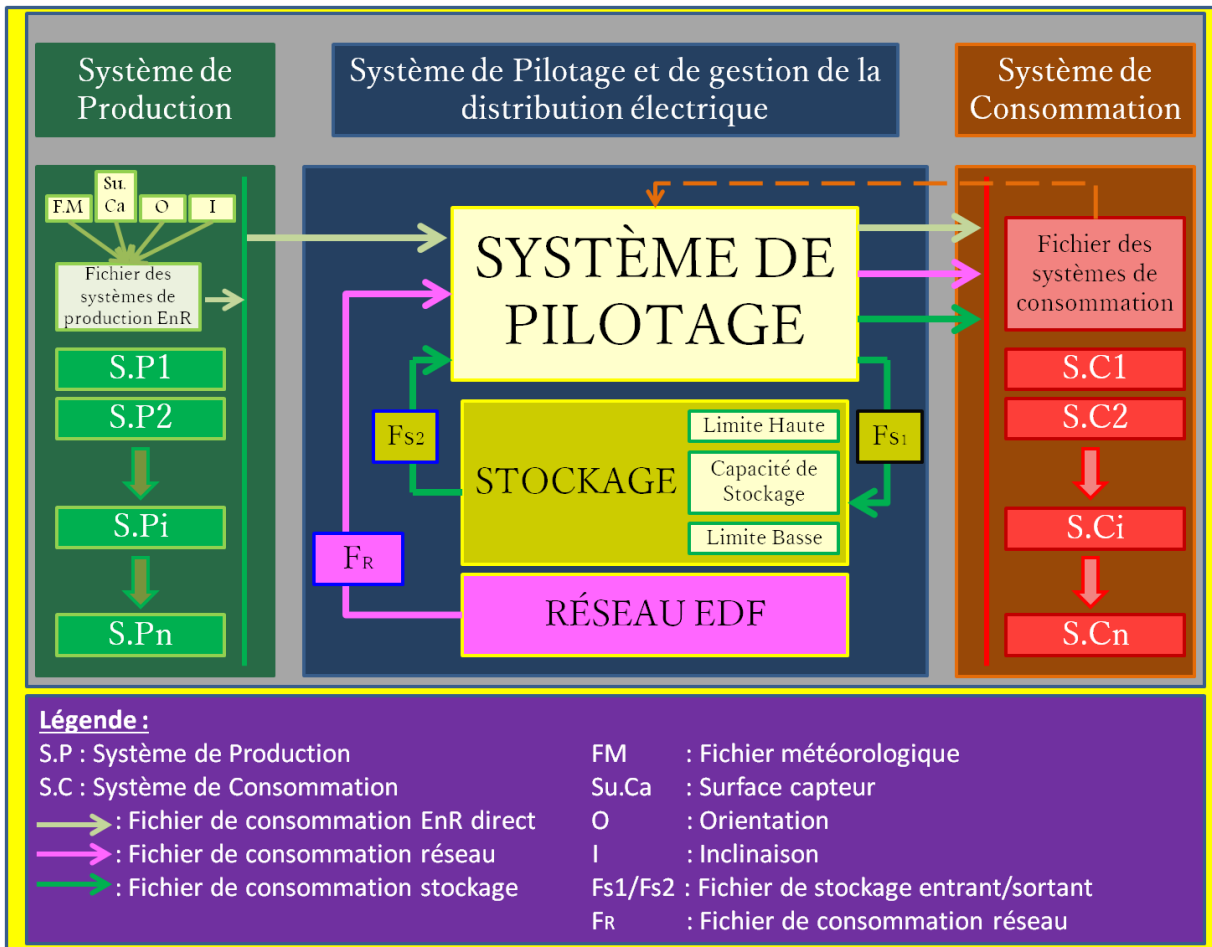


Figure 2.41 : Schématisation de l'outil de pilotage énergétique
Auteur : El Assad

Ces fichiers au niveau de la Figure 2.41 sont illustrés sur ci-dessous.

Tableau 2.15 : Illustration d'un fichier d'excédant de production (EXCi)

	Vendredi	Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Judi	Vendredi	Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Judi	Vendredi	Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Judi	Vendredi	Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Judi	Vendredi	Samedi	Dimanche					
EXC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Moyenne				
001-021	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
021-021	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
021-026	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
026-046	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
046-051	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
051-056	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
056-076	-	0,96	-	-	-	-	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00			
076-081	2,99	4,98	-	-	-	-	-	-	4,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,98		
081-091	3,11	5,19	-	-	-	-	-	-	5,99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,63	
091-101	2,80	6,17	-	-	-	-	-	-	5,68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,69	
101-111	2,91	6,51	-	-	-	-	-	-	6,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,85	
111-121	4,02	7,00	-	-	-	-	-	-	7,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,03	
121-126	4,59	7,61	6,12	6,41	6,09	3,72	-	6,97	6,34	0,24	6,66	2,01	1,91	6,32	4,98	3,34	2,58	4,06	2,15	0,24	6,42	6,67	3,40	0,95	-	2,29	-	0,24	5,71	7,52	-	-	-	4,06		
126-146	4,28	7,00	5,91	8,07	6,73	4,37	3,12	8,82	8,14	5,10	7,36	4,49	4,80	5,45	5,07	1,72	4,43	6,00	6,03	5,42	7,93	9,24	4,33	4,95	0,64	3,34	-	0,05	4,49	6,95	2,40	-	5,13			
146-151	0,52	2,86	-	-	-	-	-	5,44	5,10	-	-	-	-	-	0,94	-	-	-	-	-	-	-	5,55	0,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,96	
151-161	-	0,90	-	-	-	-	-	4,05	4,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,63	0,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,58	
161-171	-	-	-	-	-	-	-	2,04	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,48	0,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,15
171-181	-	0,35	-	-	-	-	-	2,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,47	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,19	
181-191	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
191-201	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
201-211	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
211-221	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
221-231	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
231-241	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
241-251	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Total	25,23	46,98	12,29	16,48	12,01	8,10	8,10	31,44	56,42	9,44	14,22	6,50	6,72	11,79	11,07	10,35	7,00	10,05	8,18	5,96	16,34	32,40	18,49	5,90	0,94	4,64	-	5,19	12,29	46,19	2,40	-	65,94			

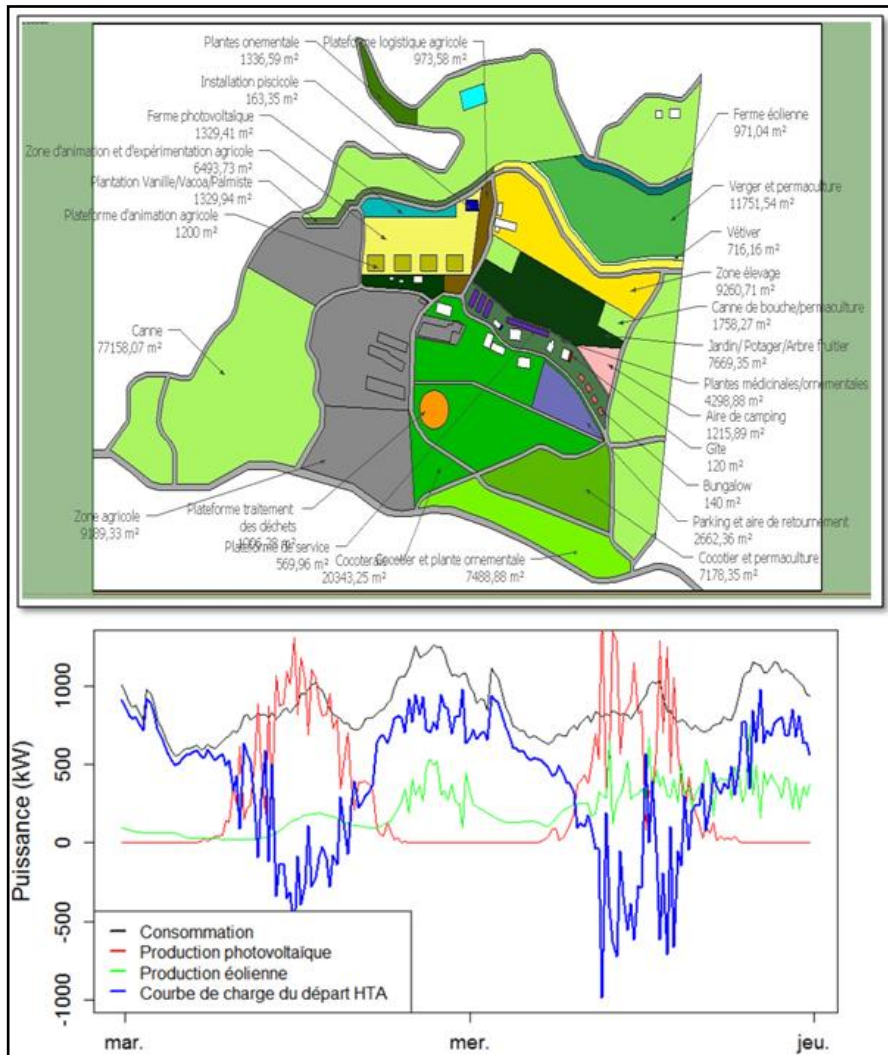
Capacité de Stockage	
Capacité de stockage (LH) [kWh]	10
Capacité limitée (LB) [kWh]	2
Limite Réseau (LR) [kWh]	10

Figure 2.42 : Exemple de capacité de stockage et de limite d'appel réseau

2.5 - Synthèse du CHAPITRE II

Dans ce second chapitre, nous avons effectué un état de l'art de méthodes existantes afin d'évaluer la consommation et la production (EnR) électrique d'un espace bâti. Nous nous sommes basés sur ces méthodes afin de réaliser nos Outils de simulation concernant la consommation et la production. Dans le prochain chapitre, nous allons effectuer une application concrète de nos Outils et du système de pilotage mis en place pour pouvoir lisser les pics d'appel de charge sur le réseau et nous les analyseront.

3 - CHAPITRE 3 - APPLICATION DES OUTILS SUR UN SYSTÈME D'ESPACE BÂTI : ECO FERME DE VINCENDO



**«Il faut une infinité de temps devant soi pour commencer à réfléchir,
une énergie infinie pour prendre la plus petite décision» Jean
Baudrillard**

3.1 - PRÉSENTATION DE L'ECO FERME ET DE SON ENVIRONNEMENT

3.1.1 - Généralités

L'Eco Ferme qui sera étudié dans ce chapitre, se situe à l'île de La Réunion et plus particulièrement dans le sud de l'île dans la commune de Saint-Joseph au lieu-dit Vincendo. Elle se situe sur une ancienne propriété agricole de 21 hectares[65]. Le réaménagement du site va être réalisé en ayant comme objectif de cerner les piliers du développement durable. Ce travail consistera aussi à mettre en avant des éléments anciens et modernes afin de ressortir le meilleur des deux entités pour proposer à ces futurs visiteurs un cadre de vie agréable qui respectera son environnement, la redécouverte des goûts et des saveurs liées à l'évolution culturelle, culinaire et historique de l'île de la Réunion.

Ensuite, nous allons présenter en détail l'Eco Ferme ainsi que les différents sous-systèmes le composant afin de pouvoir réaliser une analyse électrique complète du site. Avant cela, nous allons d'abord donner quelques informations sur la situation énergétique où se situe l'Eco Ferme, c'est-à-dire du territoire réunionnais.

3.1.2 - Situation énergétique de l'île de La Réunion

Dans cette section, nous proposons une présentation synthétisée de la situation énergétique de l'environnement (territoire de la Réunion) sur lequel se situe l'Eco Ferme étudié. Au niveau énergétique, comme pour l'ensemble des cinq départements français d'Outre-mer, l'île est fortement dépendante énergétiquement de l'extérieur, même si elle fait partie des outre-mer qui possède le taux le moins élevé de dépendance par rapport aux autres départements[66].

3.1.2.1 - Consommation énergétique totale

D'après le dernier bilan énergétique de La Réunion paru en 2016, le taux de dépendance énergétique de l'île est supérieur à 85%.

En 2016, la consommation finale énergétique totale du département était de 1000,5 ktep soit environ $1,16 \cdot 10^{10}$ kWh répartie comme indiqué au niveau du Tableau 3.1:

Tableau 3.1 : Consommation énergétique en 2016 à la Réunion

Produits	Consommation énergétique en ktep	Consommation énergétique en kWh
Carburant pour les transports	625,5	
<i>dont Essence</i>	99,6	
<i>dont Gazole routier</i>	342,4	
<i>dont Gazole maritime</i>	9,7	
<i>dont Carburéacteur</i>	173,8	
Chaleur	68,6	7,97818*10 ⁸
<i>dont résidentiel-tertiaire</i>	21,2	2,46556*10 ⁸
<i>dont Industrie</i>	47,4	5,51262*10 ⁸
Gazole non routier	49,3	
Gaz butane	23,7	
Biogaz	0,5	5815
Électricité	232,9	2,708627*10 ⁸
<i>dont résidentiel</i>	105,6	1,228128*10 ⁹
<i>dont tertiaire, industrie, agriculture</i>	127,3	1,480499*10 ⁹
Total	1000,5	4,57513*10⁹

C'est le secteur du transport qui détient la part de la consommation énergétique la plus élevée à la Réunion comme pour la métropole et les autres DOM[67] [22]. Ceci traduit une forte activité de ce secteur que ce soit au niveau des échanges en internes ou externes.

À titre d'information, nous donnons dans le tableau la consommation annuelle d'énergie primaire par habitant pour les années 2011 et 2014.

Tableau 3.2 : Consommation d'énergie primaire annuelle par habitant en 2011 [tep/hab]

	Guyane	Mayotte	France continental	Réunion	Martinique	Guadeloupe
2011	1,3	0,5	4,2	1,7	2	1,9
2014	0,9	-	4	1,6	1,7	2

Source : BEGuy, BEM, BEF, BER, BEMart, BEG

Ci-dessous les données 2011 représentées sous forme d'histogramme.

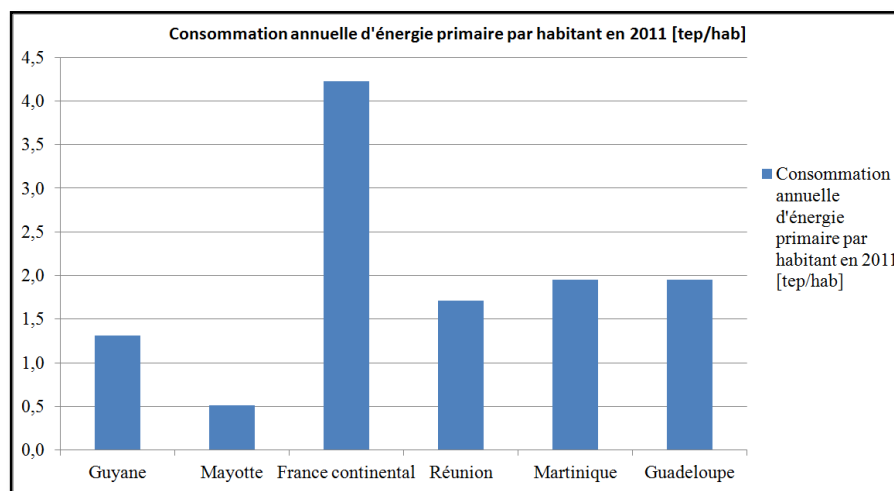


Figure 3.1 : Consommation d'énergie primaire par habitant en 2011 [tep/hab]

3.1.2.1 - Focus sur la consommation électrique

Au niveau de l'électricité, nous nous intéresserons essentiellement aux sources de production électrique, ensuite, nous analyserons la consommation sur l'année 2016.

À La Réunion, la production électrique est assurée par des énergies fossiles et des énergies renouvelables. D'après le BER de 2016, au niveau des énergies fossiles, nous avons :

- Le fioul/gazole avec une puissance installée de 291 MW;
- Le charbon (et la bagasse) avec une puissance installée de 210 MW.

Au niveau des énergies renouvelables, nous avons :

- L'hydraulique avec une puissance installée de 133,2 MW;
- L'éolienne avec une puissance installée de 16,5 MW;
- Le biogaz avec une puissance installée de 4,4 MW;
- Le photovoltaïque avec une puissance installée de 186,4 MW.

Il existe des installations de groupes électrogènes de secours ainsi que de batterie d'une puissance totale installée de 13 MW qui peuvent aussi être appelé pour renforcer la production électrique en cas de besoin.

Pour l'année 2016, la puissance nominale mise à disposition sur le réseau électrique réunionnais était de 854,5 MW pour une production électrique totale qui s'est élevée à 2943,6 GWh.

Sur ces 2943,6 GWh livré sur le réseau électrique, nous avons 66% qui proviennent des énergies fossiles et 34% des énergies renouvelables. De plus sur ces 2943,6 GWh produites, il y a eu seulement 2 708 GWh qui ont pu être consommés sur les différents secteurs d'activité que compte l'île, les autres ont été perdus entre la production et le lieu de consommation, répartie en secteur d'activité comme suit:

- 931 GWh pour les gros consommateurs;
- 93 GWh pour les collectivités locales;
- 456 GWh pour les professionnels;

- 1228 GWh pour les particuliers.

Lorsque, nous ramenons cette consommation électrique par commune, nous avons les résultats présentés sur le Tableau 3.3 ci-dessous. Le résultat de la commune de Saint-Joseph où se situe l'Eco Ferme est surligné en vert.

Tableau 3.3 : Consommation électrique estimée par commune à La Réunion de 2002 à 2016 [GWh]

	Communes	Population (2014)	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016
CINOR	Saint-Denis	146 104	399	441	470	494	529	525	526	528
	Sainte-Marie	33 456	74	86	94	104	106	113	124	128
	Sainte-Suzanne	22 620	25	32	39	45	49	51	53	57
	Sous-total	202 180	498	560	603	643	684	689	702	713
CIREST	Saint-André	56 320	90	103	113	120	140	137	143	153
	Bras-Panon	13 029	21	23	26	29	29	30	32	35
	Salazie	7 237	8	10	10	12	11	12	12	12
	Saint-Benoît	38 070	56	62	70	77	81	89	95	99
	Sainte-Rose	6 804	9	8	9	10	11	10	12	11
	Plaine des Palmistes	6 040	6	8	9	10	11	12	14	15
	Sous-total	127 500	191	213	238	257	282	290	307	326
TCO	Le Port	35 963	154	178	196	217	222	205	202	210
	La Possession	32 608	52	61	68	70	76	82	85	89
	Saint-Paul	106 104	230	252	277	292	324	321	330	345
	Trois-Bassins	7 294	11	13	14	14	15	17	17	17
	Saint-Leu	34 099	41	47	52	58	64	71	80	89
	Sous-total	216 068	488	551	608	650	701	697	713	750
CIVIS	Les Avirons	11 504	12	14	16	18	20	21	22	23
	Étang-Salé	14 313	26	37	45	48	54	57	61	69
	Saint-Louis	53 450	109	115	128	134	144	159	149	161
	Cilaos	5 401	8	9	10	10	11	11	11	12
	Saint-Pierre	82 552	190	218	251	277	302	325	338	347
	Petite-Ile	12 136	13	16	18	20	22	23	24	25
	Sous-total	179 356	359	409	468	508	552	598	604	637
CASUD	Entre-Deux	6 701	8	9	10	11	12	13	14	14
	Le Tampon	77 782	107	122	136	151	156	166	168	176
	Saint-Joseph	37 917	45	53	62	66	71	77	79	82
	Saint-Philippe	5 153	6	6	8	8	9	10	10	11
	Sous-total	127 553	166	190	216	237	248	266	271	283
Total	852 657	1701	1923	2132	2296	2467	2540	2597	2709	

Source : BER 2015

Nous remarquons, que la commune de Saint-Joseph où est situé l'Eco Ferme présente encore un faible niveau de consommation électrique par rapport aux autres communes dont la population se trouve entre 30 000 et 40 000 habitants. D'après le BER, l'écart de consommation électrique entre les communes réunionnaises s'explique essentiellement par la forte différence des activités économiques, industrielles et commerciales.

À titre indicatif, nous donnons ci-dessous quelques données en lien avec la consommation électrique de la France métropolitaine et d'autres DOM.

Tableau 3.4 : Consommation annuelle d'électricité par habitant (kWh/habitant/an)

	Guyane	Mayotte	Métropole	Réunion	Martinique	Guadeloupe
2011	3591,9	1286,3	6841,1	3015,4	3645,2	4181,5
2014	3488,1	1287,1	6702,5	3073,7	3672,7	4330,5
Variation 2014-2011	-2,89%	0,06%	-2,03%	1,93%	0,76%	3,56%

Auteur : El Assad

Source : Document IEDOM et bilan électrique spécifique à chaque DOM

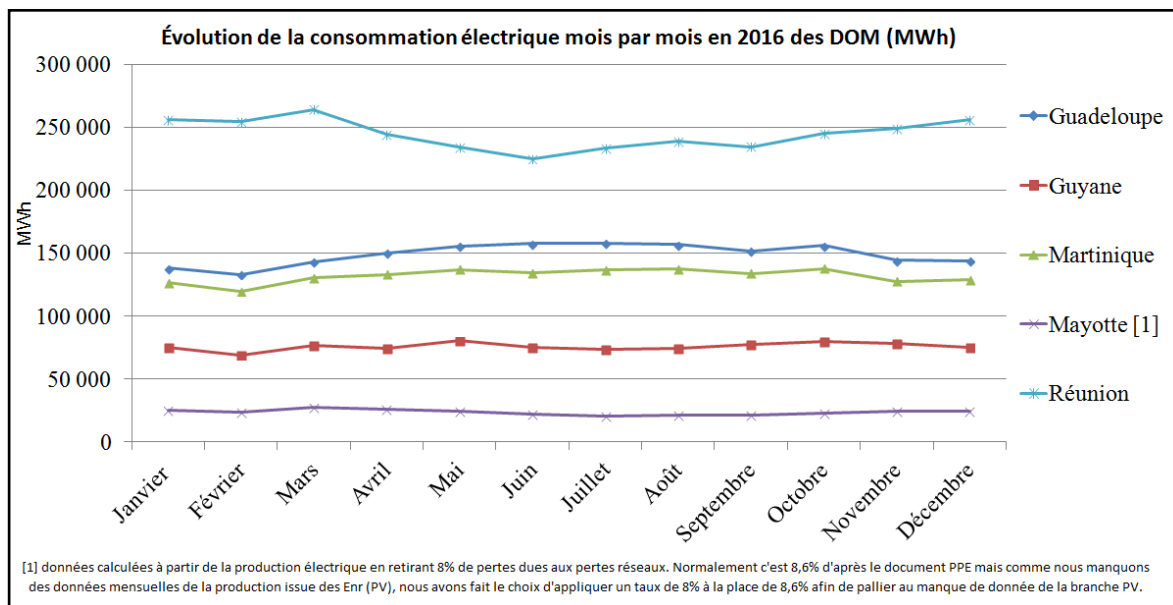


Figure 3.2 : Consommation électrique mensuelle des DOM sur 2016 [MWh]

Source : Document IEDOM et bilan électrique spécifique à chaque DOM

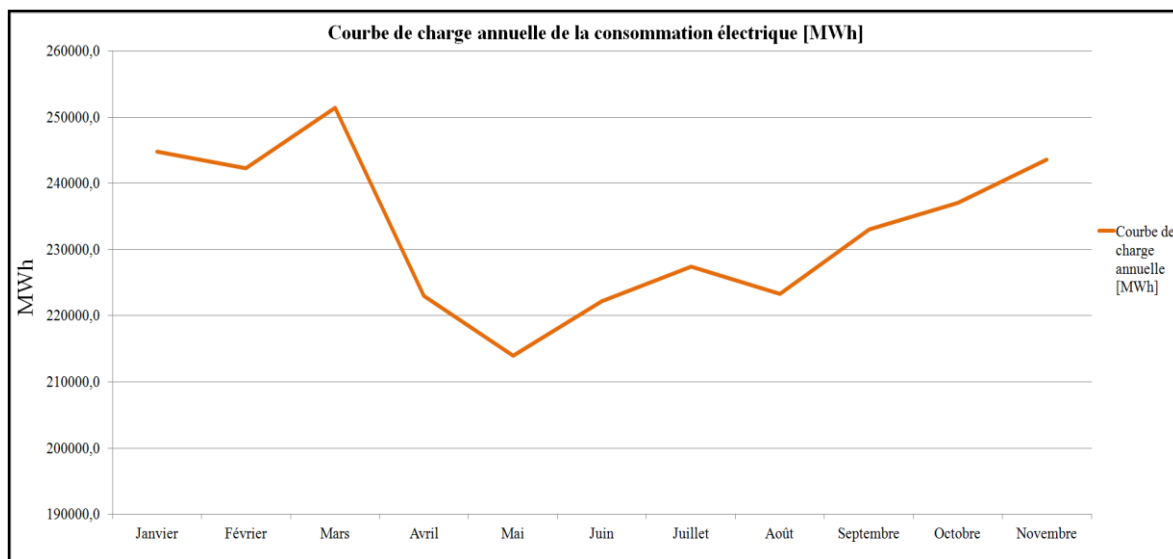


Figure 3.3 : Courbe de charge annuelle de la consommation électrique à La Réunion en 2016 [MWh]

Source : Opendata-EDF

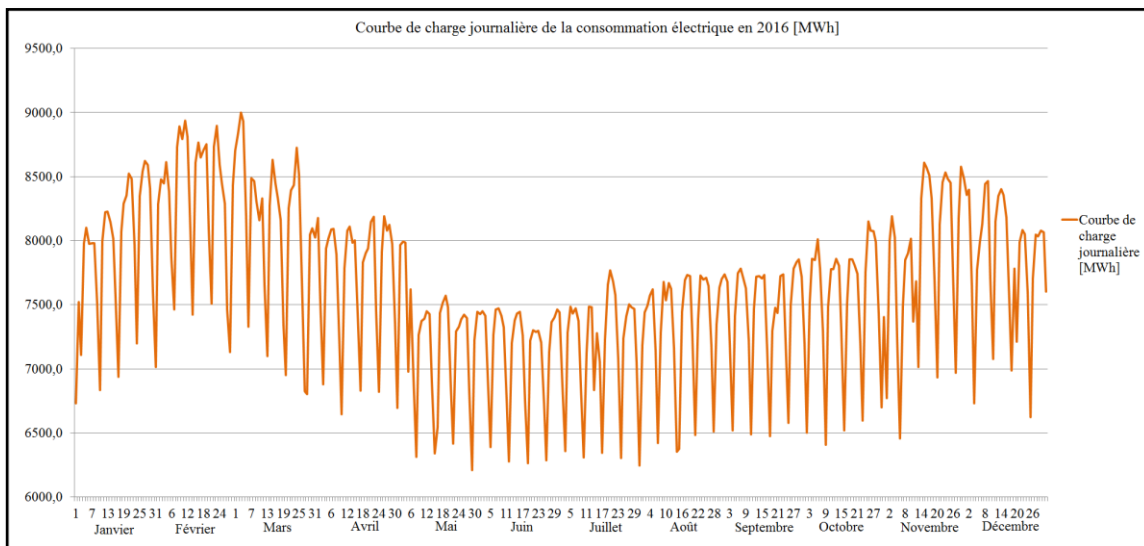


Figure 3.4 : Courbe de charge de la consommation électrique journalière sur 2016 à la Réunion [MWh]
 Source : Opendata-EDF

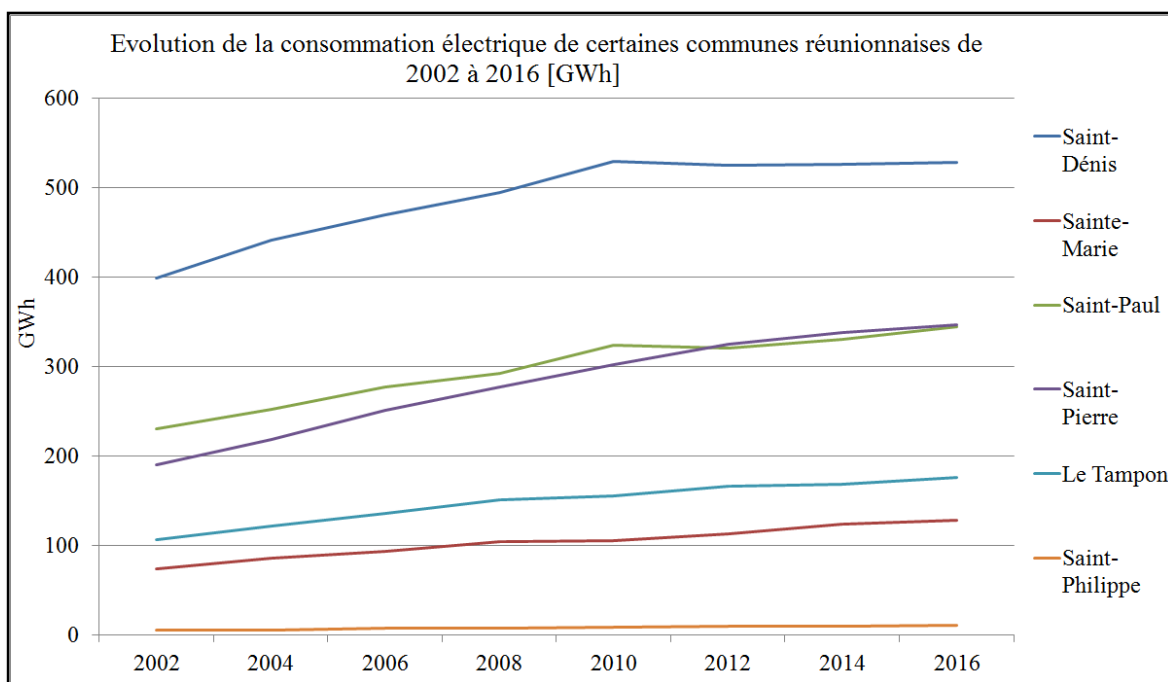


Figure 3.5 : Évolution de la consommation électrique de certaines communes réunionnaises de 2002 à 2016 [GWh]
 Source : BER 2016

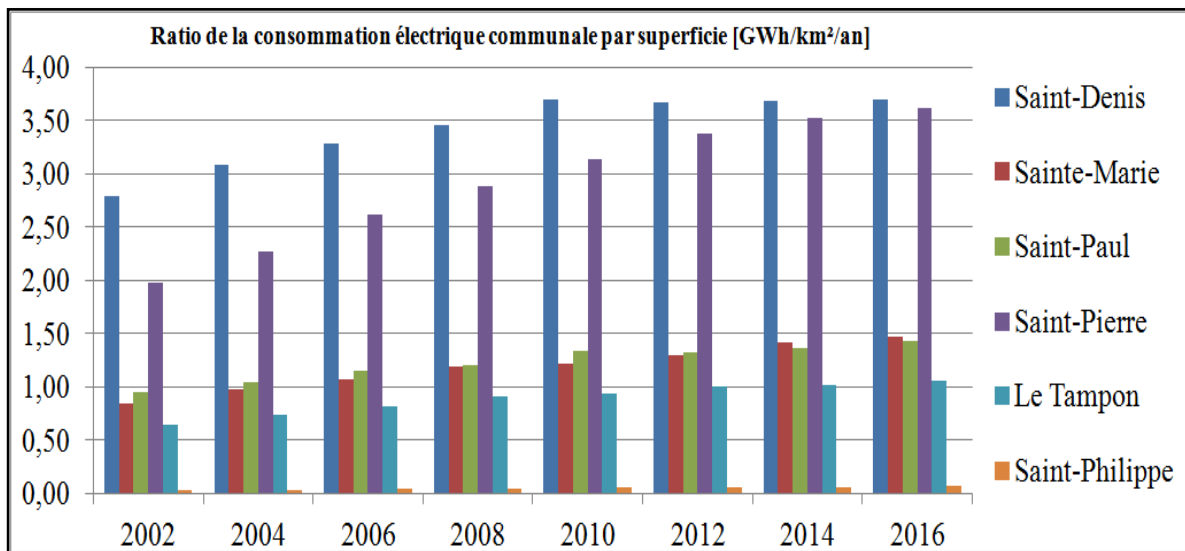


Figure 3.6 : Ratio de la consommation électrique communale selon la superficie [GWh/km²/an]
 Source : BER2016, INSEE

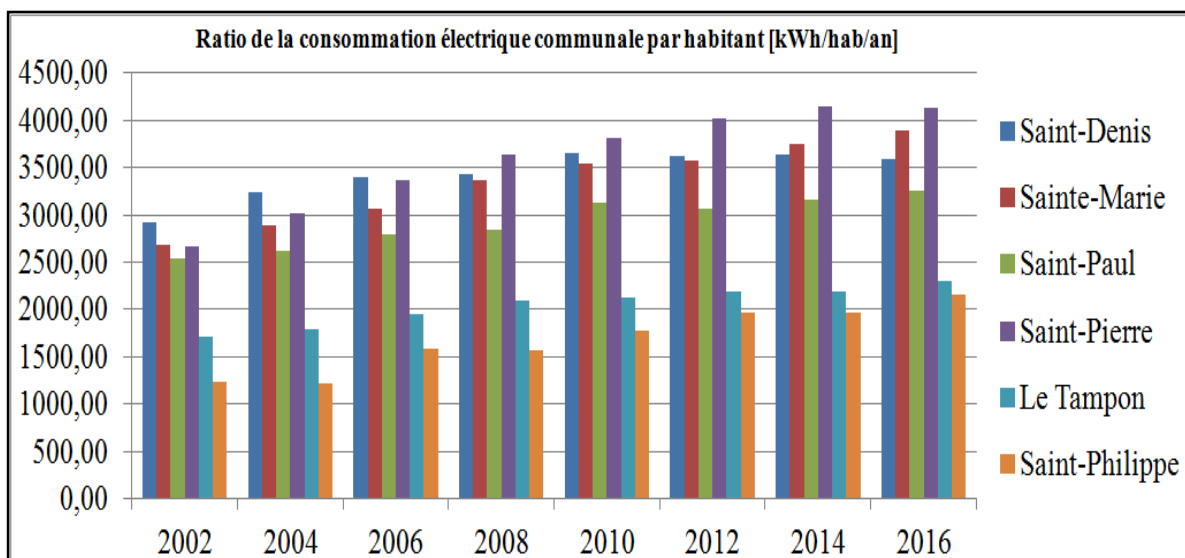


Figure 3.7 : Ratio de la consommation électrique communale par habitant [kWh/hab/an]
 Source : BER2016, INSEE

3.1.3 - Localisation et présentation de l'Eco Ferme de Vincenzo

Le site de l'Eco Ferme se situe sur le territoire communal de Saint-Joseph sur le sud de l'île. La Figure 3.8 ci-dessous donne plus de précision sur son emplacement en plus d'une vue aérienne du site.



Figure 3.8: Localisation de l'Eco Ferme
 Source : Mémoire Master2, 2012-2013, C.Hoarau[68]

L'Eco Ferme a une superficie de 21 ha. Elle a connu différentes transformations depuis l'abolition de l'esclavage sur l'île le 20 décembre 1848. Le site possède encore quelques vestiges de son passé avec notamment la présence de bâtiments anciens qui rappellent l'histoire du site. Certains de ces bâtiments subiront des rénovations afin de garder l'architecture tout en modernisant l'intérieur de l'espace.

La Figure 3.9 présentée ci-dessous donne un visuel de l'ensemble des espaces que le public retrouvera sur l'Eco Ferme.

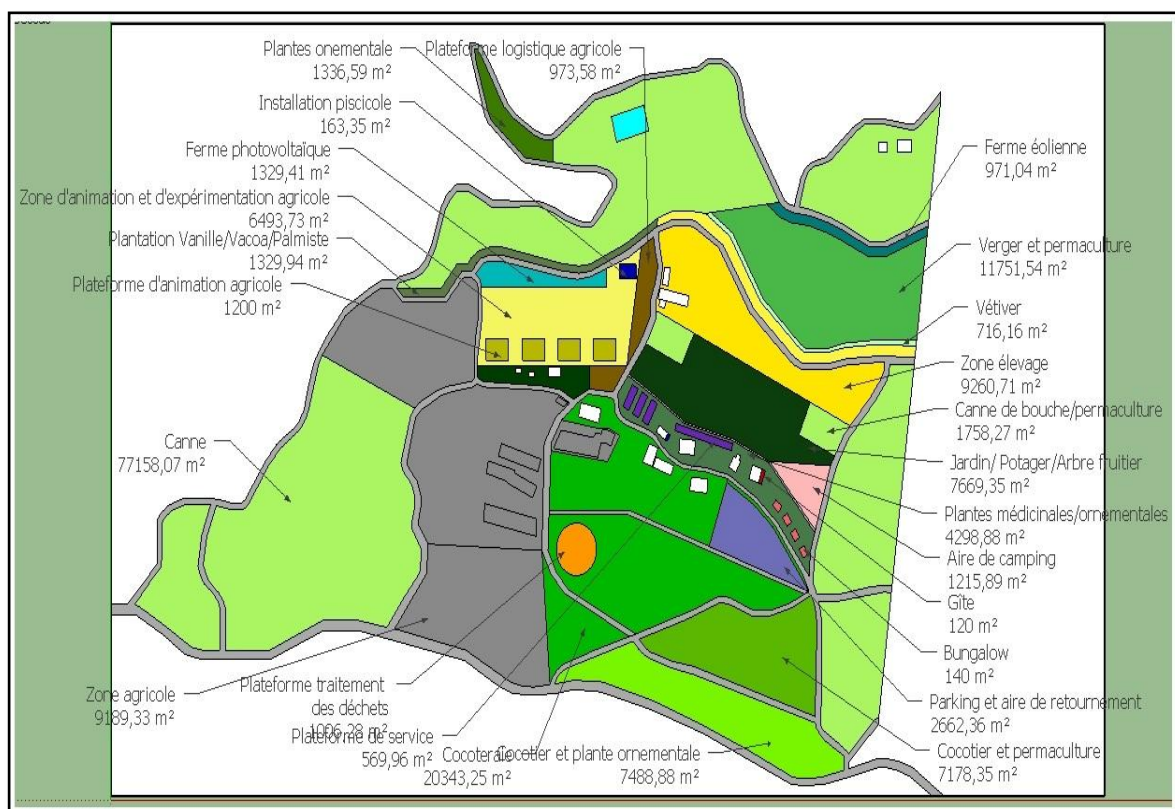


Figure 3.9 : Schéma directeur Eco Ferme de Vincendo avec ces différents espaces
 Auteur : C.Hoarau

Sur cette Figure 3.9, nous remarquons la présence de divers espaces avec des activités très variées. Ces espaces vont des zones réservées à l'élevage, aux bâtiments, à l'agriculture, à l'énergie, à la maîtrise de l'environnement, etc.. La majorité de l'espace est surtout consacrée à l'agriculture. Ce constat permet de se rendre compte qu'au niveau de l'Eco Ferme, il va y avoir différents espaces dont il faudra assurer l'alimentation électrique. Étant donné, que l'Eco Ferme s'oriente vers une forte dimension écologique, il a été décidé de se diriger vers une production électrique essentiellement basée, voir même exclusivement, sur les énergies renouvelables. Pour atteindre ces objectifs, plusieurs types d'EnR vont être associés au sein de l'Eco Ferme pour répondre à ces besoins électriques quotidiens. Nous nous basons notamment, sur des productions EnR d'origine photovoltaïque, éolienne et une production d'eau chaude obtenue à l'aide de chauffe-eau solaire. Pour arriver à dimensionner ces besoins en énergie, nous allons dans un premier temps, procéder à l'évaluation et à l'analyse des besoins énergétiques de l'Eco Ferme. Ensuite dans un second temps, nous pouvons effectuer l'évaluation de la production électrique de l'Eco Ferme selon les différents systèmes EnR qui y seront installés.

3.1.4 - Identification des besoins électriques de l'Eco Ferme

L'évaluation de la consommation électrique du système d'espace bâti Eco Ferme s'effectue sur plusieurs étapes. Une phase préliminaire consistera à répertorier l'ensemble des espaces bâtis consommant de l'électricité au niveau du site.

Dans une première étape, pour chaque espace bâti, il faudra évaluer et analyser sa consommation électrique à différentes échelles d'observation : par poste de consommation, par espace fonctionnel, par bâtiment et par Espace Bâti. Cette étude sera menée à l'échelle d'une journée type, puis à l'échelle mensuelle et enfin annuelle. Ces évaluations sur une journée type se feront au pas de temps horaire, puis au pas de temps journalier et mensuelle respectivement à l'échelle du mois et de l'année. Un premier type d'Outil d'évaluation a été mis en place pour cette première étape, à l'aide des outils qui ont déjà été mis en place.

Une seconde étape consistera à mettre en place un fichier horaire de consommation électrique à différentes échelles d'observation. Il aurait été très intéressant de procéder au calcul en se basant sur des ratios, cependant, nous manquons de bases de données conséquentes pour le faire. Nous nous sommes, néanmoins, appuyés sur des travaux connexes afin de mettre en place les fichiers horaires de consommation électrique[44] [69].

Au niveau de l'Eco Ferme, nous avons relevé neuf Espaces Bâtis consommateurs d'énergie électrique, ces espaces bâtis sont les suivants :

- Espace Artisanal;
- Espace Accueil;
- Espace Culturel;
- Espace Recherche;
- Espace Habitation/Bungalow (qui sont au nombre de quatre);
- Espace Restauration;
- Espace Expérimentation;
- Espace Gîte;
- Espace Voirie.

Nous venons de voir la démarche qui permet d'évaluer la consommation électrique du système espace bâti Eco Ferme. Nous allons à présent voir l'identification des potentiels de production électrique basés sur les EnR au niveau du système espace bâti Eco Ferme.

3.1.5 - Identification des potentiels du site de l'Eco Ferme

L'évaluation de la production électrique du système espace bâti Eco Ferme se base exclusivement sur les énergies renouvelables [70] [71]. Les différents types d'EnR, sélectionnés, sont :

- Le photovoltaïque, avec l'installation d'une ferme photovoltaïque sur une surface dont la superficie totale estimée est de 1329 m². L'installation de PV peut aussi se faire sur certaines toitures au niveau des espaces bâtis de l'Eco Ferme. La sélection d'un espace bâti se fait en s'appuyant sur la nature de sa toiture, c'est-à-dire si le toit peut accueillir des PV [72]
- L'éolien, avec l'installation d'une ferme éolienne sur une surface dont la superficie est de 971 m² et est situé sur les hauteurs du terrain. La production dépend non seulement du climat [73] mais aussi de la topographie du site d'installation [74].
- Le chauffe-eau solaire, avec l'installation de CES selon la nature de l'espace bâti. Ce type de système que nous qualifions ne permet pas de produire de l'électricité au sens propre du terme, néanmoins, il contribue à atténuer la consommation électrique en produisant de l'eau chaude à partir de l'énergie du soleil.

L'analyse des productions électriques à partir du PV et de l'éolien permettent d'estimer la production électrique totale du système espace bâti Eco Ferme. Et la production d'eau chaude solaire permet d'estimer la production d'eau chaude du site pour les espaces bâtis dont il y a un besoin identifié, et surtout de visualiser la consommation évitée au niveau du réseau. Nous optons pour ces systèmes EnR afin de diminuer l'impact carbone de l'Eco Ferme [75].

3.2 - SIMULATION DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE, ÉVALUATION ET ANALYSE

3.2.1 - Démarche

L'évaluation de la consommation électrique au niveau de l'Eco Ferme passe au préalable par l'évaluation de la consommation électrique de l'ensemble des espaces bâtis qui le composent [76]. En effet, nous nous sommes intéressés à l'évaluation électrique de l'ensemble des neuf espaces bâtis du site pour déduire la consommation électrique du système d'espace bâti Eco Ferme [77]. Pour réaliser ce travail de longue haleine, nous nous sommes notamment appuyés sur les étudiants de master du département SBE¹ afin qu'ils réalisent l'évaluation de la consommation électrique de chaque espace bâti sous forme de projet.

¹ Science du Bâtiment et de l'Environnement

3.2.2 - Simulation de la consommation électrique par tranche horaire

3.2.2.1 - Généralité

À l'aide de l'Outil réalisé afin d'évaluer la consommation électrique d'un espace bâti au pas de temps horaire, et en s'appuyant sur les coefficients de pondération par poste de consommation et des profils d'utilisation mises en place; nous avons pu ressortir la consommation horaire de chaque espace bâti du système d'espace bâti Eco Ferme étudié. Puis, nous avons eu à juste réaliser des sommes pour déterminer la consommation électrique horaire du système espace bâti étudié.

Nous allons présenter un cas d'application pour la détermination de la consommation électrique au pas de temps horaire de l'espace bâti Artisanal. C'est le même principe que nous avons utilisé pour déterminer la consommation sur les autres espaces bâtis du système espace bâti Eco Ferme au pas de temps horaire.

3.2.2.2 - Cas d'application

Au niveau de ce cas d'application, nous montrons la démarche permettant d'estimer la consommation électrique d'un espace bâti en se basant sur un cahier de charge précis de l'espace bâti.

3.2.2.2.1 - Présentation espace bâti Artisanal

L'espace bâti Artisanal sera un lieu d'échange et de rencontre autour de l'art et de la tradition réunionnaise en matière d'artisanat hérité des générations antérieures. Dans un premier temps, elle sera une vitrine de l'artisanat local, ensuite dans un second temps elle visera à rapprocher les pays du bassin de l'océan Indien voir plus par l'organisation de différentes manifestations comme par exemple des expositions culinaires, artisanaux, etc. qui devront être un moyen éducatif afin de mieux connaître les cultures et coutumes du bassin de l'océan Indien.

L'espace artisanal sera disposé dans une structure déjà existante. Cette structure sera entièrement rénovée et va allier différents matériaux tel que le béton, la brique, la tôle. Il offrira un coin jardin ainsi que des places de parking à proximité. L'espace se compose de plusieurs salles d'ateliers, d'accès pour une personne à mobilité réduite ainsi qu'une varangue donnant sur la salle d'accueil au rez-de-chaussée. Le 1er étage sera spécialement dédié aux expositions selon le thème de l'exposition, il y aura une salle d'exposition permanente et une salle d'exposition temporaire. Ci-dessous, nous pouvons visualiser une représentation 3D à l'échelle 1/1000 de l'espace bâti Artisanal.



Figure 3.10 : Plan 3D espace bâti Artisanal

Échelle : 1/1000

3.2.2.2.1.1 - Identification des bâtiments de l'espace bâti

L'espace Artisanal est constitué d'un espace d'exposition et des ateliers thématiques. Notre espace bâti est composé d'un rez-de-chaussée, que nous allons nommer « bâtiment Atelier », ainsi que d'un étage que nous allons nommer « bâtiment Exposition ». Comme cet espace offre des services, il est considéré comme faisant partie du secteur tertiaire.

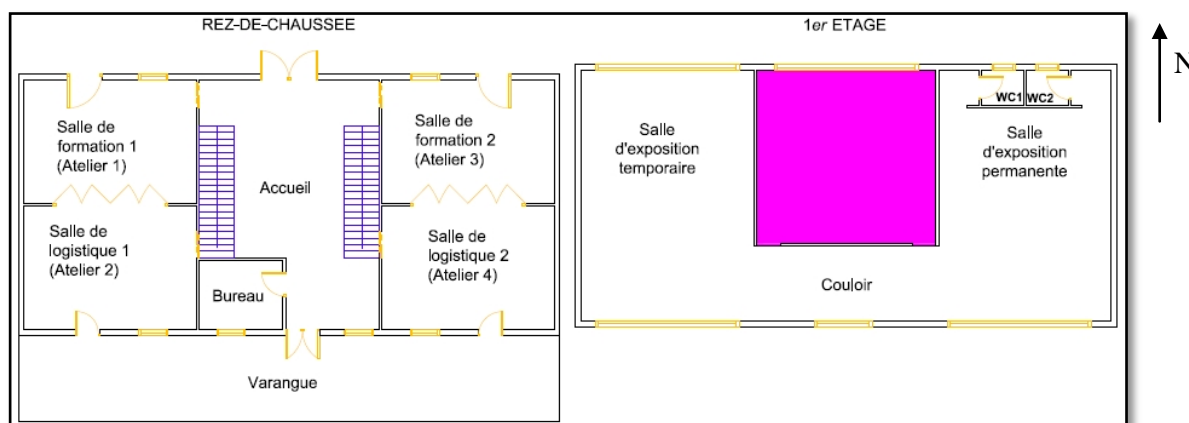


Figure 3.11 : Plan 2D des bâtiments de l'espace bâti Artisanal

Échelle : 1/1000

3.2.2.2.1.2 - Caractérisation de l'espace bâti Artisanal

L'espace bâti Artisanal a une superficie totale de 156.864 m² d'emprise au sol. Par ailleurs comme c'est un espace bâti avec un étage, sa superficie totale va être le double de sa superficie d'emprise au sol car l'étage possède les mêmes proportions que le rez-de-chaussée. Dès lors, la superficie totale de notre espace bâti Artisanal est de 313.728 m² et elle peut accueillir jusqu'à une trentaine de personnes au même moment.

Comme notre espace bâti est englobé dans un ensemble d'espace appelé « Eco Ferme », les heures d'ouverture suivront les heures habituelles de travail, à savoir de 8h-12h et de 13h-17h du lundi au

samedi. Et pour dimanche ça sera de 9h à 18h en continue pour privilégier les sorties dominicales en famille. Rappelons que pour la Réunion, d'après les sources d'EDF le prix d'électricité est d'environ 8 centimes d'euros le kWh. Et le facteur moyen d'émission direct par kWh consommé est de 721 gCO₂/kWh électrique d'après le bilan électrique réunionnais 2016 publié par l'observatoire réunionnais de l'énergie[66].

3.2.2.2.2 - Présentation des bâtiments de l'espace bâti

Comme énoncé précédemment, l'espace bâti Artisanal est composé deux bâtiments. Il y a le bâtiment Atelier et le bâtiment Exposition. Nous présenterons au niveau de ces deux bâtiments les différents espaces fonctionnels au sein desquels nous identifions les différents postes de consommation.

3.2.2.2.2.1 - Identification des espaces fonctionnels du bâtiment Atelier

Le bâtiment Atelier est composé de sept espaces fonctionnels en lien avec usages définis dans cet espace.

Les sept espaces fonctionnels du bâtiment Atelier sont les suivantes :

- Salle de formation1 (Atelier 1);
- Salle de logistique1 (Atelier 2);
- Bureau;
- Espace accueil;
- Salle de formation2 (Atelier 3);
- Salle de logistique2 (Atelier 4);
- Varangue.

La Figure 3.12 montre les espaces fonctionnels ainsi que d'autres données de notre bâtiment Atelier.

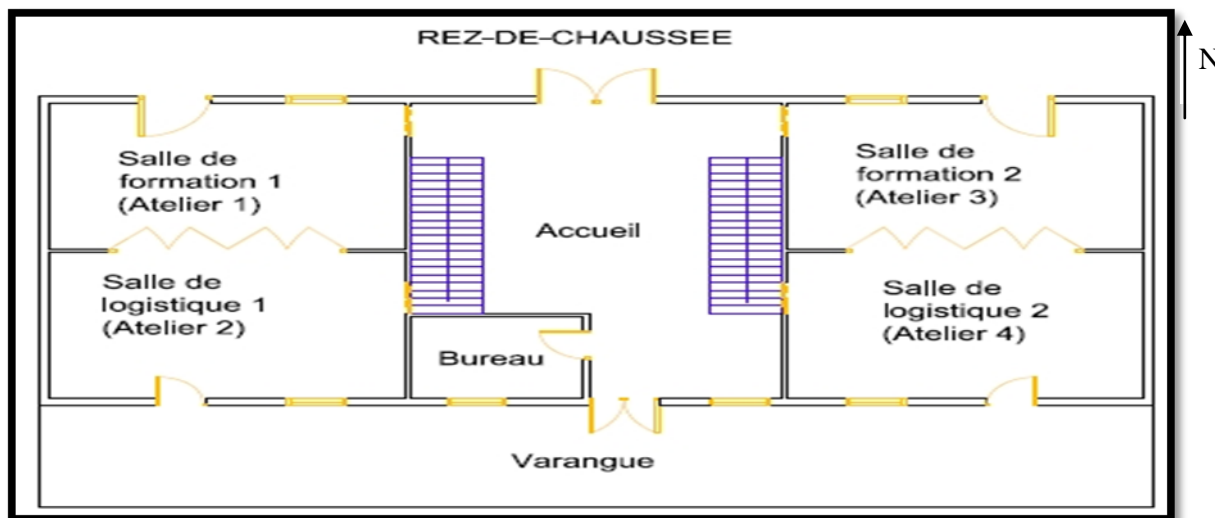


Figure 3.12 : Plan 2D bâtiment Atelier

Échelle : 1/1000

Sur cette Figure 3.12, nous avons l'ensemble des espaces fonctionnels du bâtiment Atelier qui sont représentés. Dans l'espace fonctionnel accueil, le petit espace se situant juste à droite de l'entrée principale Sud où se situe une fenêtre va être placé une table et des chaises pour l'accueil des personnes.

3.2.2.2.2 - Caractérisation du bâtiment Atelier

Le bâtiment Atelier possède une superficie de 156,864 m². Il dispose d'une capacité d'accueil de 25 personnes. Les heures d'ouverture correspondent aux heures d'ouverture de l'espace bâti énumérés au paragraphe 3.2.2.2.1.2. C'est-à-dire qu'il sera ouvert du lundi au samedi de 08h-12h et de 13h-17h et le dimanche de 09h-18h.

Le bâtiment Atelier possède une hauteur sous plafond de 3m. Dans ce bâtiment, nous allons trouver 6 fenêtres, 5 portes simples, 2 grandes portes, 2 portes coulissantes, 2 portes à 4 vantaux, 2 baies vitrées comme mur de séparation entre l'accueil et les salles d'ateliers et enfin 2 escaliers.

3.2.2.2.3 - Identification des espaces fonctionnels du bâtiment Exposition

Le bâtiment Exposition est composé de cinq espaces fonctionnels et permettra d'exposer le travail des personnes qui sont formées dans les salles de formations de notre espace bâti Artisanal. Il permettra également d'accueillir des expositions temporaires. Les cinq espaces fonctionnels sont les suivants :

- Couloir;
- Salle d'exposition temporaire;
- Salle d'exposition permanente;
- W.C1;

- W.C2.

La Figure 3.13 montre les espaces fonctionnels ainsi que d'autres données de notre bâtiment Exposition.

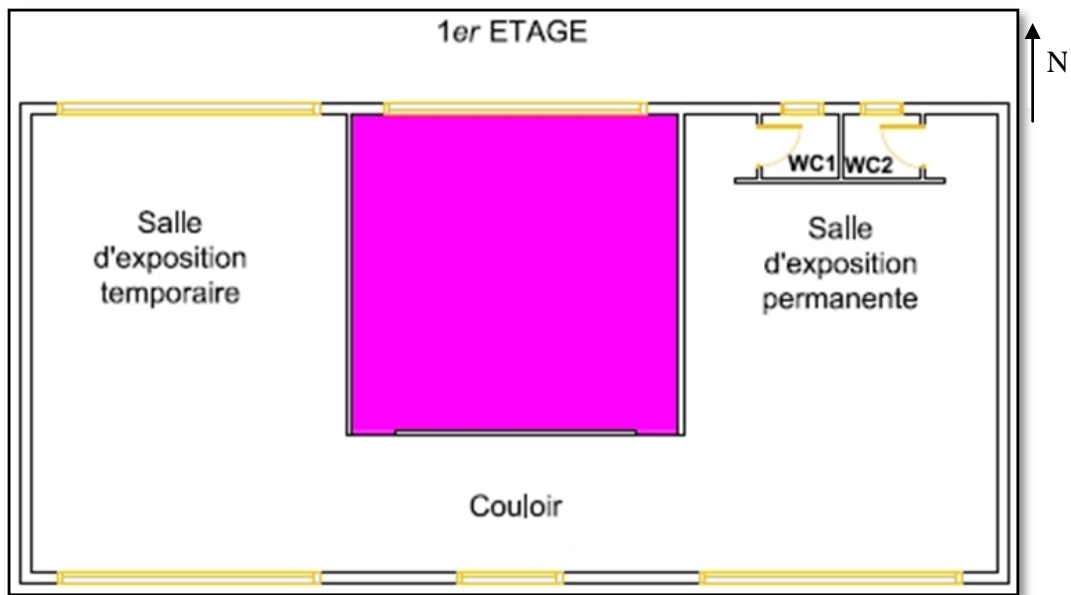


Figure 3.13 : Plan 2D du bâtiment Exposition

Échelle : 1/1000

Sur cette Figure 3.13, nous avons l'ensemble des espaces fonctionnels du bâtiment Exposition qui sont représentés.

3.2.2.2.4 - Caractérisation du bâtiment Exposition

Le bâtiment Exposition possède une superficie totale de 118,8 m² et est composé de cinq espaces fonctionnels. Il pourra accueillir environ une vingtaine de personnes. Les heures d'ouverture restent les mêmes que celles du bâtiment Atelier. Il possède une hauteur sous plafond de 3m. Ce bâtiment dispose de 7 ouvertures hautes et 2 portes. Les heures d'ouverture correspondent aux heures d'ouverture de l'espace bâti énumérés au paragraphe 3.2.2.1.2. C'est-à-dire qu'il sera ouvert du lundi au samedi de 08h-12h et de 13h-17h et le dimanche de 09h-18h.

3.2.2.2.3 - Description des espaces fonctionnels du bâtiment Atelier

Le bâtiment Atelier est composé de sept espaces fonctionnels, qui sont :

- Accueil, c'est l'espace fonctionnel principale où les visiteurs arrivent en premier. Il possède différents passages pour accéder aux autres espaces fonctionnels du bâtiment Atelier. Il possède une superficie de 46,164 m² et pourra contenir environ une dizaine d'individus au maximum en même temps;

- Bureau, Cet espace fonctionnel servira à la gestion courante de l'espace bâti Artisanal. Il possède deux ouvertures, une fenêtre et une porte. Cet espace fonctionnel possède une superficie de 7,5 m² et pourra au maximum deux personnes plus le personnel;
- Atelier1, l'espace fonctionnel Atelier1 est prévu pour des séances d'atelier autour du thème de l'artisanat. Il est équipé d'une fenêtre et de trois portes. La première porte permet l'accès à l'accueil, la seconde porte permet d'accéder à l'extérieur du bâtiment et la troisième porte est une grande porte coulissante rabattable qui permet l'accès à l'Atelier2 ou sinon de faire en sorte pour que l'Atelier1 et 2 forment un grand espace si les besoins l'exigent. L'Atelier1 possède une superficie de 25,8 m² et pourra accueillir environ une dizaine de personnes au maximum au même moment;
- Atelier2, cet espace fonctionnel possède les mêmes caractéristiques que l'Atelier1;
- Atelier3, il possède aussi presque les mêmes caractéristiques que l'Atelier1 sauf que la troisième porte présente permet cette fois le passage entre l'Atelier3 et l'Atelier4;
- Atelier4, cet espace fonctionnel a les mêmes caractéristiques que l'Atelier3;
- Varangue, C'est l'espace fonctionnel où les gens pourront venir se poser sur des tables aménagés avec une vue sur la mer. La Varangue possède une superficie de 54,72m².

3.2.2.2.3.1 - Identification des postes de consommation

Chacun des espaces fonctionnels de ce bâtiment disposent de postes de consommation propre à son fonctionnement. Nous allons ici lister pour chaque espace fonctionnel du bâtiment Atelier, les postes de consommation s'y afférant.

Tableau 3.5 : Présentation des postes de consommation des espaces fonctionnels du bâtiment Atelier

Espace fonctionnel	Postes de consommation transversaux	Postes de consommation spécifiques
Accueil	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Confort ▪ Nettoyage ▪ Éclairage ▪ Bureautique ▪ Sécurité 	
Bureau	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Confort ▪ Nettoyage ▪ Éclairage ▪ Bureautique 	
Atelier1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Confort ▪ Nettoyage ▪ Éclairage ▪ Sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Outillage
Atelier2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Confort ▪ Nettoyage ▪ Éclairage ▪ Sécurité 	
Atelier3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Confort ▪ Nettoyage ▪ Éclairage ▪ Sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Outillage
Atelier4	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Confort ▪ Nettoyage ▪ Éclairage ▪ Sécurité 	
Varangue	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nettoyage ▪ Éclairage 	

3.2.2.2.3.2 - Identification des composants

Composants présents dans l'espace fonctionnel Accueil :

Composants des Postes de consommation transversaux :

Tableau 3.6 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Accueil

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Éclairage	Tube à LED	4	9	0,025	0,475
	Lampe de bureau à LED	5		0,015	
Nettoyage	Aspirateur	1	1	0,3	0,3
Confort	Brasseur d'air	1	1	0,075	0,075
Bureautique	Téléphone-fax	1	3	0,1	1
	Imprimante multifonction	1		0,2	
	Ordinateur de bureau	1		0,5	
Sécurité	Caméra de surveillance	1	2	0,03	0,04
	Dispositif de sécurité incendie	1		0,01	

Composants présents dans l'espace fonctionnel Bureau :

Composants des Postes de consommation transversaux :

Tableau 3.7 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Bureau

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Éclairage	Néon à LED	1	3	0,024	0,117
	LBC	2		0,015	
Nettoyage	Aspirateur	1	1	0,3	0,3
Confort	Brasseur d'air	1	1	0,075	0,075
Bureautique	Téléphone-fax	1	3	0,3	1
	Imprimante multifonction	1		0,2	
	Ordinateur de bureau	1		0,5	

Composants présents dans l'espace fonctionnel Atelier 1 :

Composants des Postes de consommation transversaux :

Tableau 3.8 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Atelier 1

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Éclairage	Néon à LED	2	4	0,024	0,078
	LBC	2		0,015	
Nettoyage	Aspirateur	1	1	0,3	0,3
Confort	Brasseur d'air	1	1	0,075	0,075
Bureautique	Imprimante multifonction	1	2	0,2	0,7
	Ordinateur de bureau	1		0,5	
Sécurité	Dispositif de sécurité incendie	1	1	0,01	0,01

Composants des Postes de consommation spécifiques :

Tableau 3.9 : Composants des postes de consommation spécifiques de l'espace fonctionnel Atelier 1

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Outillage	Perceuse électrique	2	12	1	9,44
	Visseuse électrique	2		0,7	
	Perceuse sans fil	2		0,1	
	Visseuse sans fil	2		0,07	
	Meuleuse	1		2,2	
	Ponceuse	1		0,3	
	Scie	2		1,6	

Composants présents dans l'espace fonctionnel Atelier 2 :

Composants des Postes de consommation transversaux :

Tableau 3.10 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Atelier 2

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Éclairage	Néon à LED	2	4	0,024	0,078
	LBC	2		0,015	
Nettoyage	Aspirateur	1	1	0,3	0,3
Confort	Brasseur d'air	1	1	0,075	0,075
Sécurité	Dispositif de sécurité incendie	1	1	0,01	0,01

Composants présents dans l'espace fonctionnel Atelier 3 :

Composants des Postes de consommation transversaux :

Tableau 3.11 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Atelier 3

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Éclairage	Néon à LED	2	4	0,024	0,078
	LBC	2		0,015	
Nettoyage	Aspirateur	1	1	0,3	0,3
Confort	Brasseur d'air	1	1	0,075	0,075
Bureautique	Imprimante multifonction	1	2	0,2	0,7
	Ordinateur de bureau	1		0,5	
Sécurité	Dispositif de sécurité incendie	1	1	0,01	0,01

Composants des Postes de consommation spécifiques :

Tableau 3.12 : Composants des postes de consommation spécifiques de l'espace fonctionnel Atelier 3

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Outillage	Perceuse électrique	2	12	1	9,44
	Visseuse électrique	2		0,7	
	Perceuse sans fil	2		0,1	
	Visseuse sans fil	2		0,07	
	Meuleuse	1		2,2	
	Ponceuse	1		0,3	
	Scie	2		1,6	

Composants présents dans l'espace fonctionnel Atelier 4 :

Composants des Postes de consommation transversaux :

Tableau 3.13 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Atelier 4

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Éclairage	Néon à LED	2	4	0,024	0,078
	LBC	2		0,015	
Nettoyage	Aspirateur	1	1	0,3	0,3
Confort	Brasseur d'air	1	1	0,075	0,075
Sécurité	Dispositif de sécurité incendie	1	1	0,01	0,01

Composants présents dans l'espace fonctionnel Varangue :

Composants des Postes de consommation transversaux :

Tableau 3.14 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Varangue

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Éclairage	LBC	3	3	0,015	0,045
Nettoyage	Aspirateur	1	1	0,3	0,3

3.2.2.2.4 - Description des espaces fonctionnels du bâtiment Exposition

Le bâtiment Exposition est situé à l'étage du bâtiment Atelier et est composé de cinq espaces fonctionnels, qui sont :

- Couloir, c'est l'espace fonctionnel où les gens accèdent en premier en pénétrant au niveau du bâtiment Exposition. à partir, de cet espace fonctionnel, les gens peuvent accéder à deux espaces fonctionnels. En tournant à droite, ils arrivent à l'espace fonctionnel Salle d'Exposition Temporaire et sur la gauche, ils vont accéder à l'espace fonctionnel Salle d'Exposition Permanente. L'espace fonctionnel Couloir possède une superficie de 15,6 m²;
- Salle d'Exposition Temporaire (SET), comme son nom l'indique, cet espace fonctionnel servira à l'exposition des œuvres d'artiste dans un temps défini. Il permettra de faire connaître d'autre style d'artisanat et aussi à partager des idées ou création exceptionnelle. Il occupe une superficie de 51,6 m²;
- Salle d'Exposition Permanente (SEP), Cet espace fonctionnel concourra à l'exposition des œuvres issues du travail du personnel en formation, ou encore à exposer l'histoire et l'évolution du système d'espace bâti Eco Ferme. La superficie de cet espace fonctionnel est de 48 m²;
- W.C1 d'une superficie de 1,8 m²;
- W.C2 d'une superficie de 1,8 m².

3.2.2.2.4.1 - Identification des postes de consommation

Chacun de des espaces fonctionnels disposent de postes de consommation propre à son fonctionnement. Nous allons ici lister pour chaque espace fonctionnel du bâtiment exposition, les postes de consommation présentent.

Tableau 3.15 : Présentation des postes de consommation des espaces fonctionnels du bâtiment Exposition

Espace fonctionnel	Postes de consommation transversaux
Couloir	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nettoyage ▪ Éclairage ▪ Sécurité
Salle d'exposition temporaire	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Confort ▪ Nettoyage ▪ Éclairage ▪ Multimédia ▪ Sécurité
Salle d'exposition permanente	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Confort ▪ Nettoyage ▪ Éclairage ▪ Sécurité
W.C 1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nettoyage ▪ Éclairage
W.C 2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nettoyage ▪ Éclairage

3.2.2.2.4.2 - Identification des composants

Composants présents dans l'espace fonctionnel Couloir :

Composants des Postes de consommation transversaux :

Tableau 3.16 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Couloir

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Éclairage	LBC	1	1	0,015	0,015
Nettoyage	Aspirateur	1	1	0,3	0,3
Sécurité	Dispositif de sécurité incendie	1	1	0,01	0,01

Composants présents dans l'espace fonctionnel Salle d'exposition temporaire :

Composants des Postes de consommation transversaux :

Tableau 3.17 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Salle d'exposition temporaire

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Éclairage	LBC	2	2	0,015	0,03
Nettoyage	Aspirateur	1	1	0,3	0,3
Confort	Brasseur d'air	1	1	0,075	0,075
Multimédia	Vidéoprojecteur	1	3	0,3	0,9
	TV Plasma	1		0,3	
	Lecteur DVD	1		0,3	
Sécurité	Dispositif de sécurité incendie	1	2	0,01	0,04
	Caméra de vidéosurveillance	1		0,03	

Composants présents dans l'espace fonctionnel Salle d'exposition permanente :

Composants des Postes de consommation transversaux :

Tableau 3.18 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Salle d'exposition permanente

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Éclairage	LBC	2	2	0,015	0,03
Nettoyage	Aspirateur	1	1	0,3	0,3
Confort	Brasseur d'air	1	1	0,075	0,075
Sécurité	Dispositif de sécurité incendie	1	1	0,01	0,01

Composants présents dans l'espace fonctionnel W.C 1 :

Composants des Postes de consommation transversaux :

Tableau 3.19 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel W.C 1

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Éclairage	LBC	1	1	0,015	0,015
Nettoyage	Aspirateur	1	1	0,3	0,3

Composants présents dans l'espace fonctionnel W.C 2 :

Composants des Postes de consommation transversaux :

Tableau 3.20 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel W.C 2

Postes de consommation	Composants	Nombre de composant	Total composant	Puissance unitaire (kW)	Total puissance installée
Éclairage	LBC	1	1	0,015	0,015
Nettoyage	Aspirateur	1	1	0,3	0,3

Après avoir décrit de manière détaillée l'ensemble des composants ainsi que les caractéristiques générales de l'espace bâti Artisanal, il reste la dernière partie de l'acquisition de donnée à cerner.

3.2.2.2.5 - Paramètres exploités pour les calculs

Il existe plusieurs paramètres à prendre en compte afin de pouvoir évaluer la consommation électrique au pas de temps horaire d'un espace bâti.

Ces paramètres sont :

Tableau 3.21 : Les étapes de détermination de la consommation électrique journalière et annuelle, de son coût à l'année et du bilan carbone associé d'un espace bâti

Étapes	Dénomination	Explicitation
1	Identification de l'espace bâti	Information général sur le type d'espace bâti, son secteur d'activité, ces caractéristiques générales. Visualisation d'une image 3D de l'espace bâti et définition de ces bâtiments
2	Description du sous-système bâtiment	Identification du bâtiment et visualisation d'une image 2D du bâtiment ainsi que de l'ensemble de ces espaces fonctionnels. Présentation des données caractéristiques générales du bâtiment
3	Description du sous-système espace fonctionnel	Présentation des données caractéristiques générales pour chaque espace fonctionnel et définition des postes de consommation
4	Description des postes de consommation	Identification des différents postes de consommation présents (transversaux ou spécifiques) et définition des composants
5	Description de chaque composant	Identification de chaque composant pour chaque poste de consommation
6	Données techniques de chaque composant	Quantité de chaque composant d'un poste de consommation
7	Données techniques de chaque composant	Puissance en kWh de chaque composant
8	Durée d'utilisation journalière de chaque composant sur une journée type	Nombre de minute d'utilisation sur 1 heure de chaque composant d'un poste de consommation et sur une journée type
9	Résultat sur la consommation horaire et totale journalière	Consommation horaire et totale journalière par composant d'un poste de consommation
10	Résultat totale sur la consommation horaire et totale journalière	Consommation horaire et totale journalière d'un poste de consommation
11	Durée d'utilisation mensuelle par composant	Nombre de jour d'utilisation sur un mois
12	Coefficient mensuel de pondération par composant	Coefficient mensuelle de pondération compris entre 0 et 1 selon le degré de sollicitation du composant dans le mois
13	Consommation mensuelle et totale annuelle d'un composant	Résultat sur la consommation mensuelle et totale annuelle
14	Consommation totale mensuelle et annuelle d'un poste de consommation	Résultat sur la consommation totale annuelle

15	Résultat graphique	Résultat graphique Visualisation sous forme graphique de la courbe de consommation journalière par composant pour un poste de consommation
16	Résultat graphique	Visualisation sous forme graphique des histogrammes de consommation annuelle par composant pour un poste de consommation
17	Résultats consommation, coût annuel de la consommation et bilan carbone associé	Consommation totale journalière et annuelle d'un poste de consommation par composant + parts des coûts de cette consommation et bilan carbone associé à cette consommation
18	Résultats consommation journalière et annuelle, coût annuel de la consommation et bilan carbone associé + Résultat graphique	Consommation totale journalière et annuelle d'un espace fonctionnel par poste de consommation + parts des coûts de cette consommation et bilan carbone associé
19	Résultat sur la consommation totale journalière et annuelle + Résultat graphique	Consommation totale journalière et annuelle d'un bâtiment par espace fonctionnel ou poste de consommation + parts des coûts de cette consommation et bilan carbone associé à cette consommation
20	Résultat sur la consommation totale journalière et annuelle + Résultat graphique	Consommation totale journalière et annuelle d'un espace bâti par bâtiment ou espace fonctionnel ou poste de consommation + parts des coûts de cette consommation et bilan carbone associé

Les paramètres en couleur orange correspondent à des paramètres d'entrée de l'Outil d'évaluation. Les paramètres en couleur verte correspondent à des sorties d'évaluation, résultat des calculs d'évaluation.

3.2.3 - Évaluation et Analyse des consommations électriques du S.E.B et du bilan carbone

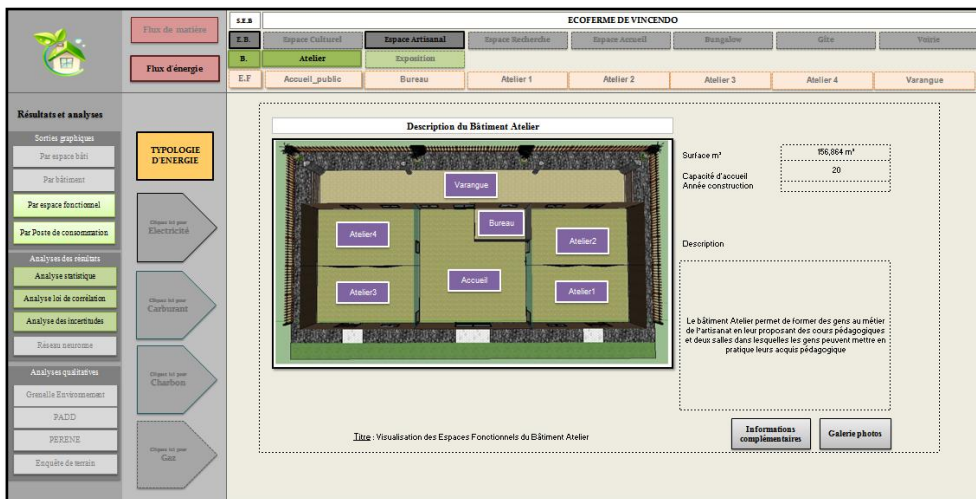
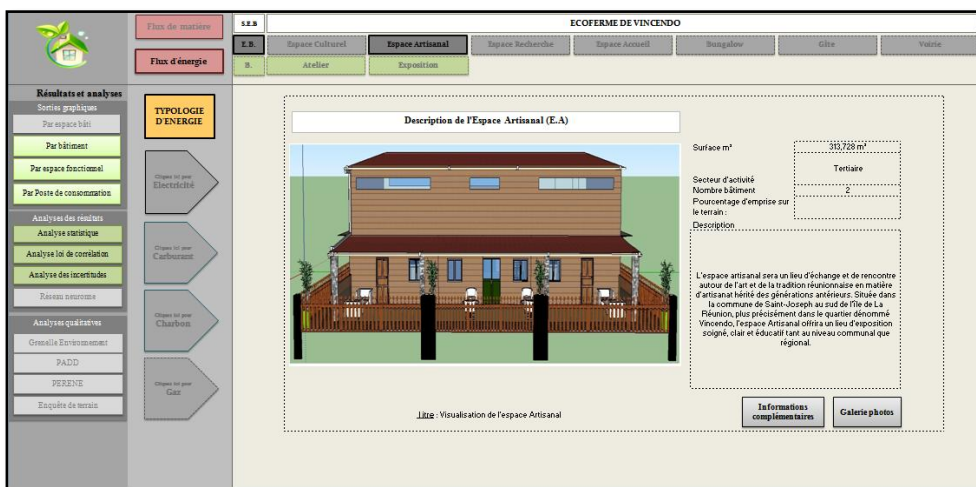
Nous présenterons les résultats détaillés pour l'Espace Bâti Artisanal. Puis des résultats synthétiques pour l'ensemble des espaces bâtis de l'Eco Ferme.

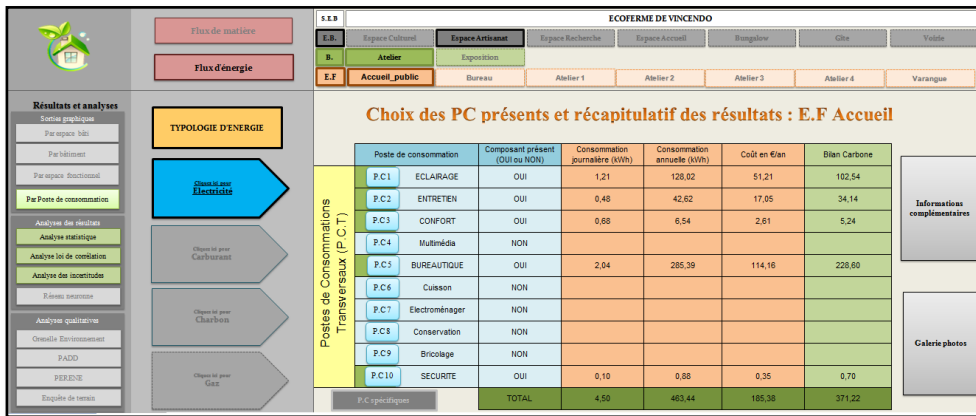
Nous avons décidé de présenter les résultats des analyses des consommations électriques sur l'Espace Bâti Artisanal. Sur l'ensemble des Espaces Bâtis de l'Eco Ferme nous présenterons les résultats synthétiques en lien avec le fichier horaire de consommation.

3.2.3.1 - Outil d'analyse de la consommation électrique de l'espace bâti Artisanal

3.2.3.1.1 - Consommation journalière, annuelle, part des coûts de cette consommation selon le niveau d'observation et bilan carbone associé

Nous présentons ici les résultats numérique et graphique de l'espace bâti Artisanal. D'abord, nous commencerons par donner les pages qui permettent d'aboutir aux pages de résultat au niveau d'un ou des composant(s) d'un poste de consommation donné. Ensuite, nous donnerons les résultats de l'espace bâti par poste de consommation, puis par espace fonctionnel et enfin par bâtiment.

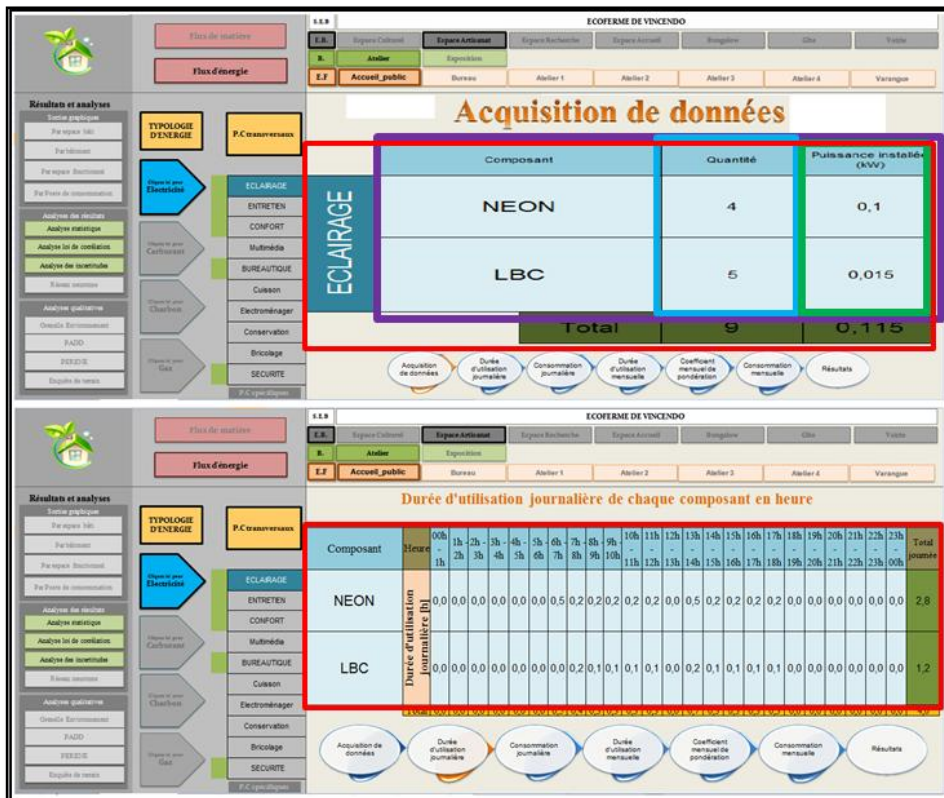




Étape

3

Description espace fonctionnel



Étapes

4 Description des PC

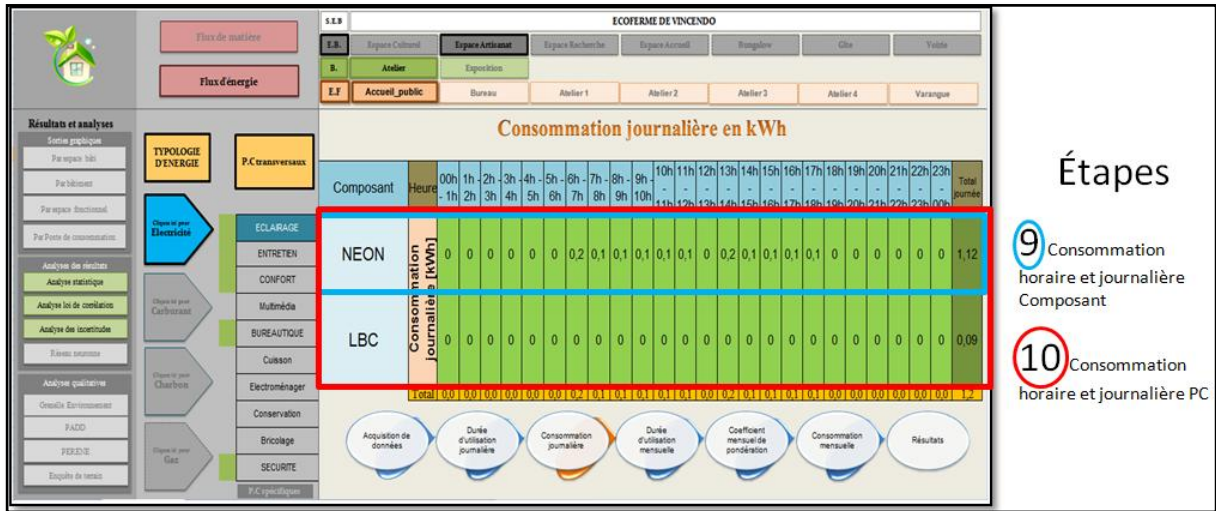
5 Description Composant

6 Données techniques composant

7 Données techniques composant

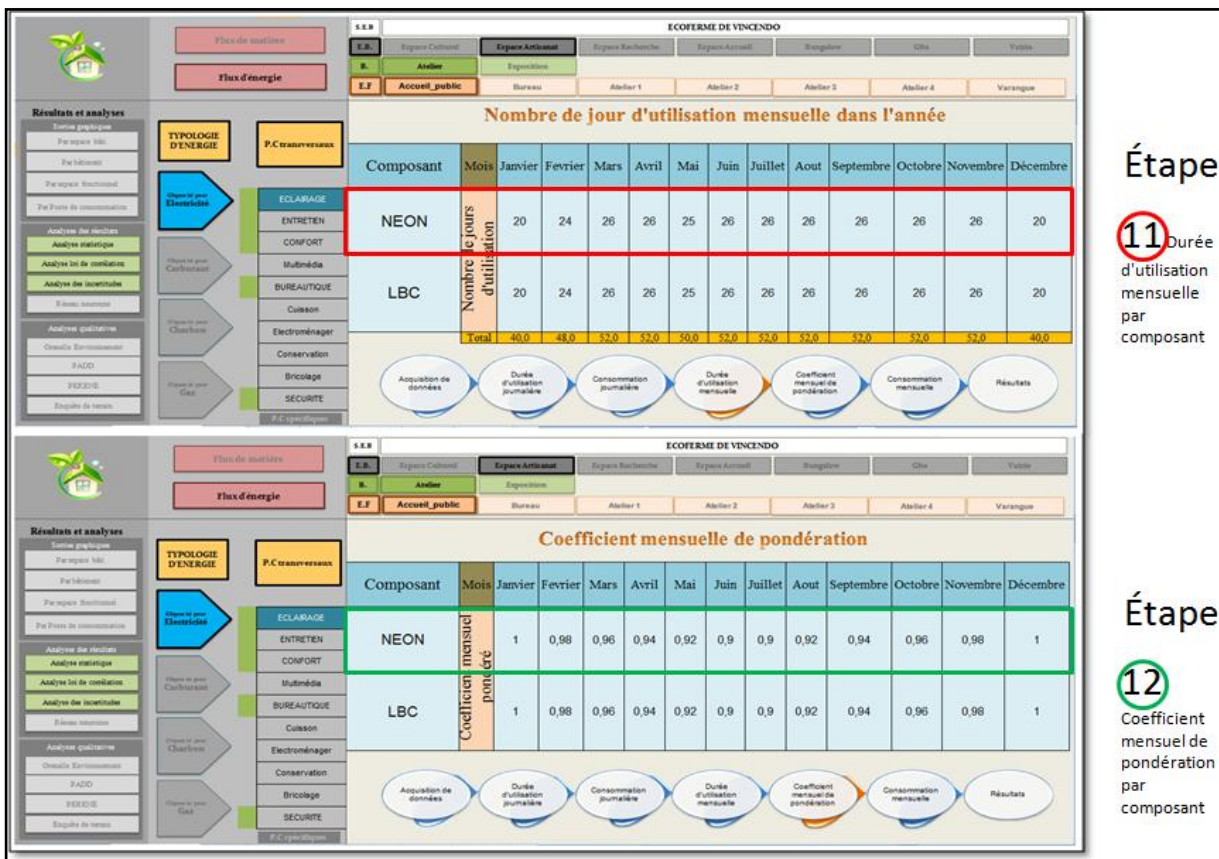
8 Durée d'utilisation journalière de chaque composant

Figure 3.14 : Acquisition des données techniques et de durée d'utilisation journalière par composant



- Étapes
- 9 Consommation horaire et journalière Composant
 - 10 Consommation horaire et journalière PC

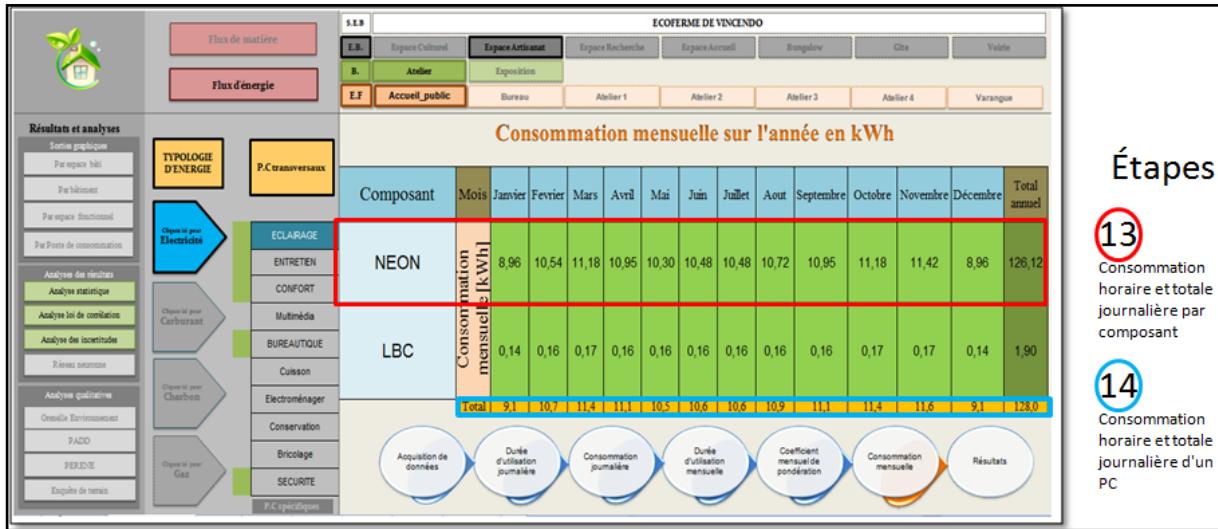
Figure 3.15 : Consommation électrique journalière par composant



- Étape
- 11 Durée d'utilisation mensuelle par composant

- Étape
- 12 Coefficient mensuel de pondération par composant

Figure 3.16 : Acquisition de la durée d'utilisation mensuelle et du coefficient mensuel de pondération par composant

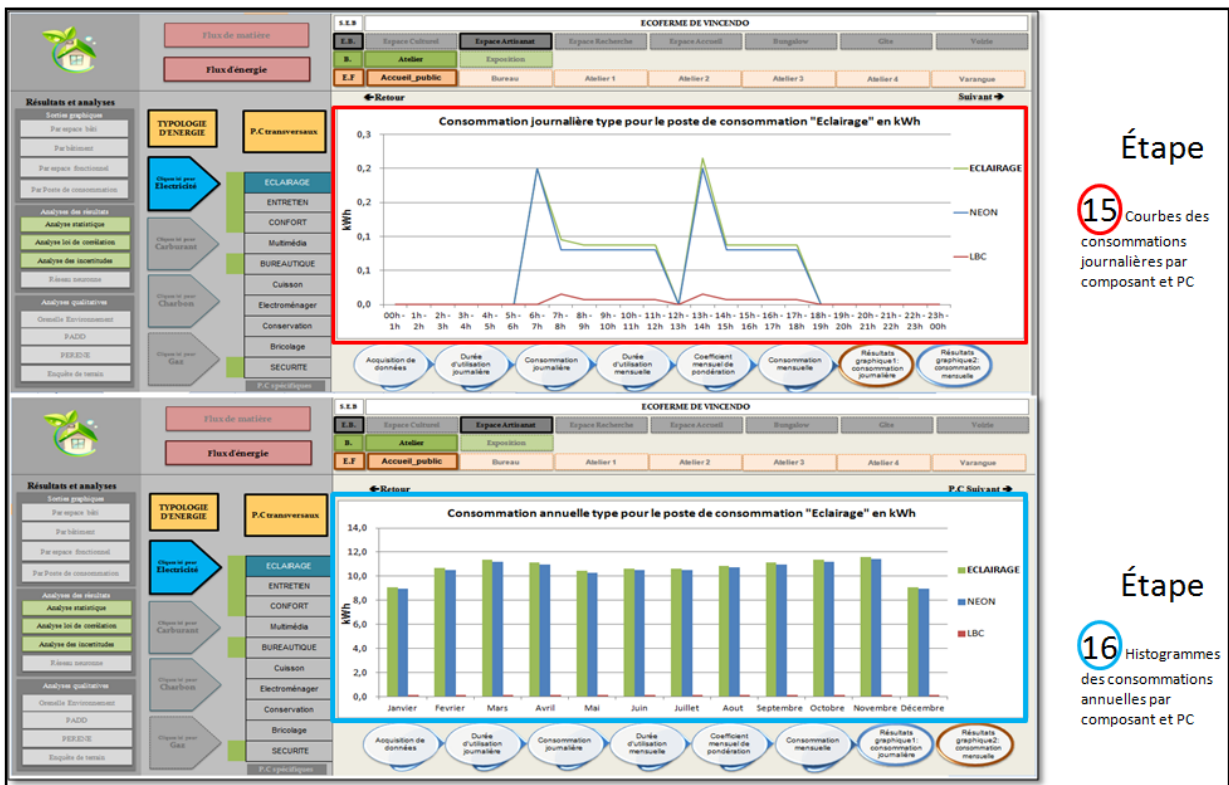


Étapes

13 Consommation horaire et totale journalière par composant

14 Consommation horaire et totale journalière d'un PC

Figure 3.17 : Consommation mensuelle et annuelle par composant et par poste de consommation



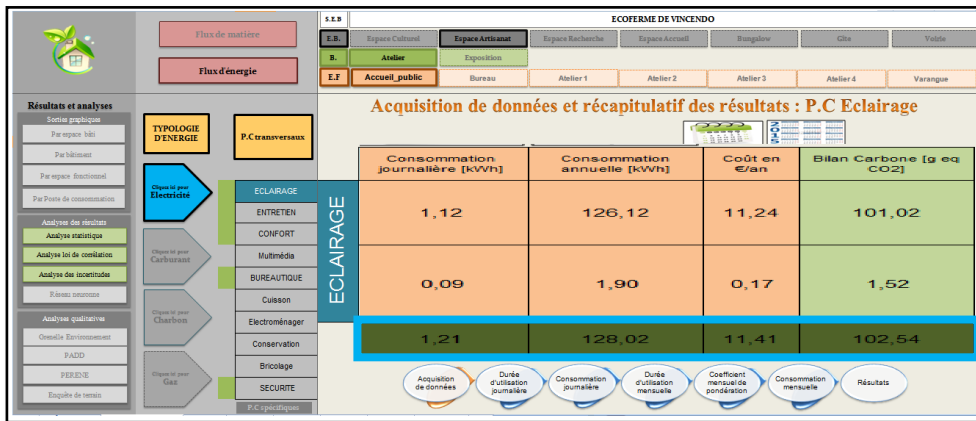
Étape

15 Courbes des consommations journalières par composant et PC

Étape

16 Histogrammes des consommations annuelles par composant et PC

Figure 3.18 : Représentation graphique des consommations journalières et annuelles



Étape 17 Consommation totale journalière et annuelle d'un poste de consommation

Figure 3.19 : Consommation totale journalière et annuelle d'un poste de consommation



Étape 18 Consommation totale journalière et annuelle d'un espace fonctionnel par PC, plus coûts et bilan carbone de la consommation annuelle

Résultat graphique consommation journalière par PC [kWh]

Résultat graphique consommation annuelle par PC [kWh]

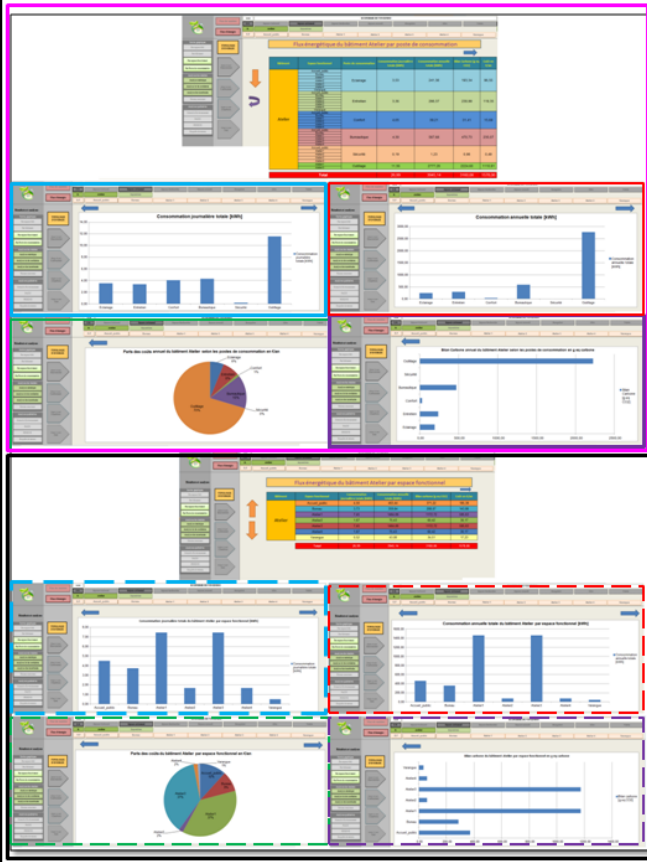
Résultat graphique des parts des coûts de la consommation annuelle par PC [%]

Résultat graphique du bilan carbone de la consommation annuelle par PC [g eq CO2]

Figure 3.20 : Résultats au niveau d'un espace fonctionnel

Étape 19

Consommation totale journalière et annuelle d'un bâtiment par poste de consommation ou espace fonctionnel, coût et bilan carbone de la consommation annuelle



Résultat graphique consommation journalière par PC [kWh]

Résultat graphique consommation annuelle par PC [kWh]

Résultat graphique des parts des coûts de la consommation annuelle par PC [kWh]

Résultat graphique du bilan carbone de la consommation annuelle par PC [kWh]

Résultat graphique consommation journalière par EF [kWh]

Résultat graphique consommation annuelle par EF [kWh]

Résultats graphique des parts des coûts de la consommation annuelle par EF [kWh]

Résultats graphique du bilan carbone de la consommation annuelle par EF [kWh]

Figure 3.21 : Résultat au niveau d'un bâtiment

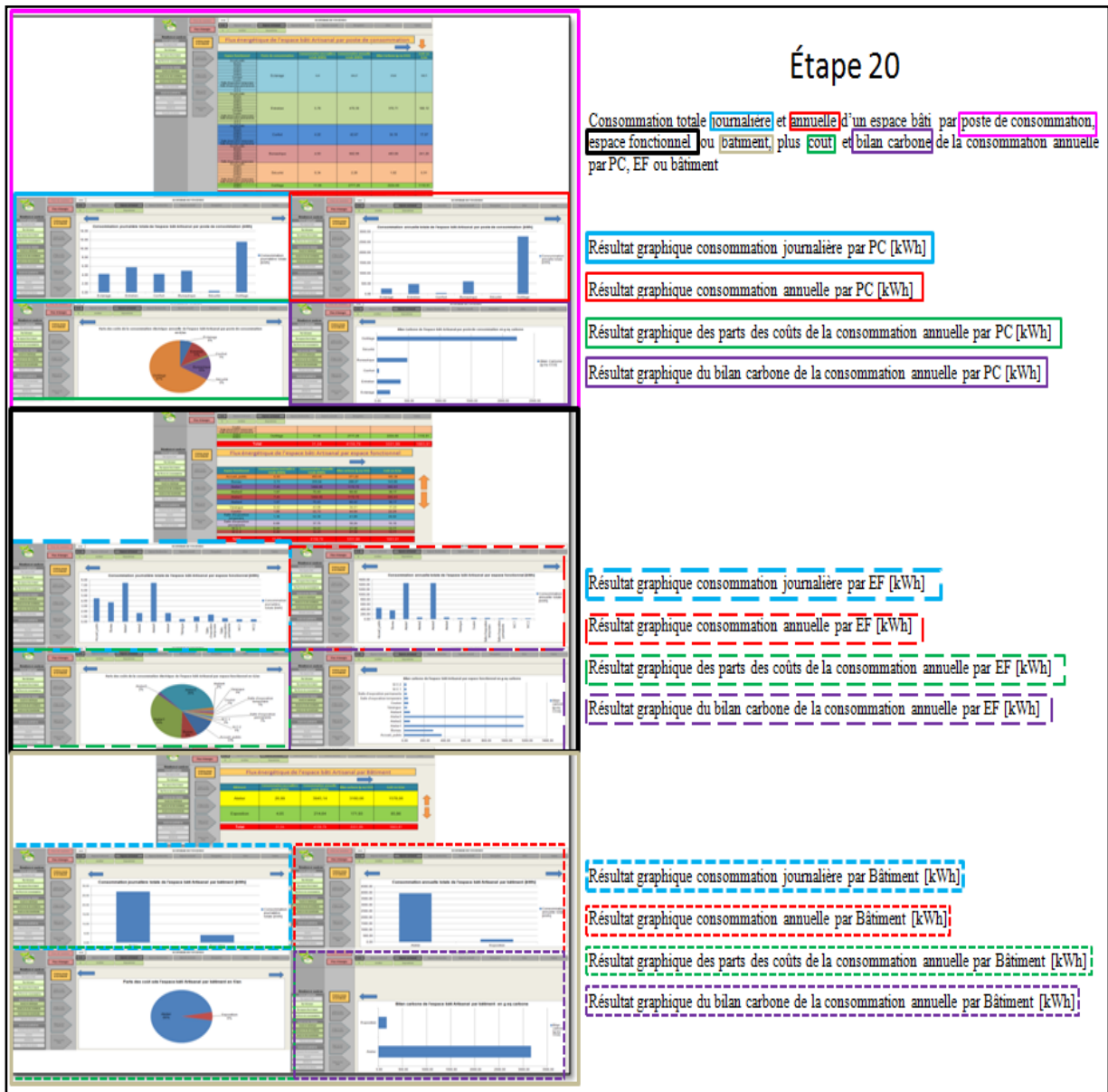


Figure 3.22 : Résultat au niveau d'un espace bâti

3.2.3.2 - Mise en œuvre du fichier horaire de la consommation électrique de l'Eco Ferme

Nous présentons sur le Tableau 3.22, l'ensemble des espaces bâtis qui compose l'Eco Ferme dans une approche systémique autour des espaces fonctionnels et des postes de consommation respectifs. Les composants associés aux postes de consommation présentés ne sont pas présentés car il y'en a énormément et cela alourdirai sensiblement le tableau en terme de lecture.

Tableau 3.22 : Les espaces bâtis de l'Eco Ferme et les sous systèmes associés

Espace bâti	Bâtiment	Espace fonctionnel	Postes de consommation présents	
			Postes de consommation transversaux	Postes de consommation spécifiques
Artisanal (S = 314 m ²)	Atelier	Accueil	Confort / Nettoyage / Éclairage / Bureautique / Sécurité	-
		Bureau	Confort / Nettoyage / Éclairage / Bureautique	-
		Atelier1 (Salle de formation1)	Confort / Nettoyage / Éclairage / Sécurité	Outillage
		Atelier2 (salle de logistique1)	Confort / Nettoyage / Éclairage / Sécurité	-
		Atelier3 (Salle de formation2)	Confort / Nettoyage / Éclairage / Sécurité	Outillage
		Atelier4 (Salle de logistique2)	Confort / Nettoyage / Éclairage / Sécurité	-
		Varangue	Nettoyage / Éclairage	-
	Exposition	Couloir	Nettoyage / Éclairage / Multimédia / Sécurité	-
		Salle d'exposition temporaire	Confort / Nettoyage / Éclairage / Sécurité	-
		Salle d'exposition permanente	Confort / Nettoyage / Éclairage / Sécurité	-
		W.C.1	Nettoyage / Éclairage /	-
		W.C.2	Nettoyage / Éclairage /	-
	Accueil (S = 300 m ²)	Réception	Marche d'entrée	Nettoyage / Éclairage /
Hall			Confort / Nettoyage / Éclairage / Bureautique / Multimédia / Sécurité	-
Salle de réunion			Confort / Nettoyage / Éclairage / Bureautique / Électroménager	-
Bureau1			Confort / Nettoyage / Éclairage / Bureautique	-
Bureau2			Confort / Nettoyage / Éclairage / Bureautique	-
Salle informatique			Confort / Nettoyage / Éclairage / Bureautique	-
Exposition		Salonnier	Confort / Nettoyage / Éclairage	-
		Couloir	Nettoyage / Éclairage	-
		Comble1	Éclairage	-
		Comble2	Éclairage	-
		Comble3	Éclairage	-
		W.C.1	Éclairage	-
		W.C.2	Éclairage	-
Culturel (S = 760 m ²)	Amphithéâtre	Estrade	Nettoyage / Éclairage / Multimédia	-
		Gradins	Nettoyage / Éclairage	-
	Salle verte	Podium	Nettoyage / Éclairage / Multimédia	-
		Plateforme	Nettoyage / Éclairage	-
		Loges	Confort / Nettoyage / Éclairage / Multimédia	-
		Toilettes	Confort / Nettoyage / Éclairage	-
	Atelier musical	Accueil	Confort / Nettoyage / Éclairage / Multimédia	-
		Bloc technique	Nettoyage / Éclairage	-
		Salle de cours	Confort / Nettoyage / Éclairage / Multimédia	-
		Cabine de mixage	Confort / Nettoyage / Éclairage / Multimédia	-
	Cabine d'enregistrement	Confort / Nettoyage / Éclairage / Multimédia	-	

Recherche (S=250 m ²)	Recherche	Salle de formation	Confort / Nettoyage / Éclairage / Multimédia / Bureautique	-
		Salle d'expérimentation	Confort / Nettoyage / Éclairage / Conservation / Bureautique / Cuisson / Bricolage / Électroménager	-
		Box 1	Confort / Nettoyage / Éclairage / Bureautique	-
		Box 2	Confort / Nettoyage / Éclairage / Bureautique	-
		Box 3	Confort / Nettoyage / Éclairage / Bureautique	-
		Toilettes	Éclairage	-
		W.C. 1	Éclairage	-
		W.C. 2	Éclairage	-
		Varangue 1	Éclairage	-
		Varangue 2	Éclairage	-
Restauration (S=130 m ²)	Restauration	Comptoir	Nettoyage / Éclairage / Bureautique	-
		Salle à manger	Confort / Éclairage / Multimédia	-
		Salle de réserve	Éclairage / Conservation	-
		Cuisine	Confort / Nettoyage / Éclairage / Cuisson / Électroménager / Conservation	-
		Comptabilité (Bureau)	Confort / Éclairage / Bureautique	-
		Laverie	Nettoyage / Éclairage	-
		Sanitaires	Éclairage	-
		Terrasse	Éclairage	-
Local déchets	Éclairage	-		
Gîte (S=150 m ²)	Auberge	Séjour	Confort / Nettoyage / Éclairage / Multimédia / Cuisson / Conservation	-
		Couloir	Nettoyage / Éclairage	-
		Chambre1	Confort / Nettoyage / Éclairage	-
		Chambre2	Confort / Nettoyage / Éclairage	-
		Chambre3	Confort / Nettoyage / Éclairage	-
		Buanderie	Nettoyage / Éclairage / Électroménager	-
		W.C.1	Nettoyage / Éclairage	-
		W.C.2	Nettoyage / Éclairage	-
		Douche1	Nettoyage / Éclairage	-
Douche2	Nettoyage / Éclairage	-		
Habitation (Bungalow, S = 60,58 m ² pour un bungalow et il y'en a quatre, S _{habitation} = 242,32 m ²)	Bungalow	Salon	Confort / Nettoyage / Éclairage / Multimédia	-
		Cuisine	Confort / Nettoyage / Éclairage / Cuisson / Électroménager / Conservation	-
		Sanitaires	Nettoyage / Éclairage	-
		Chambre1	Confort / Nettoyage / Éclairage	-
		Chambre2	Confort / Nettoyage / Éclairage	-
		Véranda	Nettoyage / Éclairage	-
Expérimentation ou plateforme environnementale (S=380 m ²)	Salle de Tri et de contrôle	Collecte et Tri	Confort / Nettoyage / Éclairage / Sécurité	-
		Incinération	Nettoyage / Éclairage	-
	Systèmes de traitement	Méthanisation	Éclairage	Appareillage
		Compostage	Nettoyage / Éclairage	-
		Station d'épuration	-	Appareillage
		ISD	Nettoyage / Éclairage	-
Voirie	Voirie	Espace vert	Nettoyage	-
		Aire de stationnement	Nettoyage / Éclairage / Sécurité	-
		Voie de circulation	Nettoyage / Éclairage	-

A partir de ces identifications de l'ensemble des espaces bâtis, de leurs espaces fonctionnels et poste de consommation associés au niveau de l'Eco Ferme, nous pouvons présenter les résultats obtenus à partir de l'Outil de simulation horaire de la consommation électrique.

Les résultats sont donnés au niveau journalier (sur une journée type), hebdomadaire, mensuel et annuel. Nous présenterons les résultats sur des périodes significatives caractérisant les consommations d'été, d'hiver et de saison intermédiaire représentant les situations climatiques au niveau de l'île de La Réunion.

Nous présenterons donc les résultats pour les mois janvier, de juillet et d'avril afin d'avoir une idée plus représentative du comportement électrique de l'Eco Ferme selon les saisons.

Avant de donner le résultat graphique, nous allons d'abord donner le résultat annuel de la consommation électrique de l'Eco Ferme par espace bâti ainsi que le bilan carbone de chaque espace bâti. Le bilan carbone est calculé en prenant le résultat de la consommation annuel pour le multiplier par le facteur d'émission de l'année 2016 obtenu à partir du bilan électrique de La Réunion de 2016[66].

Tableau 3.23 : Récapitulatif des données et résultats de l'Eco Ferme

Espace Bâti	Surface unitaire [m ²]	Consommation électrique annuelle [kWh]	Bilan carbone associé [gCO ₂ /kWh]
Artisanal	314	8 361,83	6 028,88
Accueil	300	7 107,55	5 124,55
Culturel	760	33 447,31	24 115,51
Recherche	250	14 215,10	10 249,09
Restauration	130	50 165,93	36 169,63
Gîte	150	10 034,19	7 234,65
Bungalow (*4)	242,32	44 317,68	31 953,05
Plateforme environnementale	380	2 926,64	2 110,11
Voirie	1000 (surface ou l'éclairage est requis estimée)	63 802,92	46 001,91
Total système consommatrice d'énergie de l'Eco Ferme	3 344,58	234 379,15	168 987,37
Total Eco Ferme	210 000	234 379,15	168 987,37

Au niveau de l'Eco Ferme, d'après les hypothèses présentées pour chaque espace bâti, ce sera l'espace bâti Culturel le plus consommateur en énergie suivi de l'espace restauration. La consommation électrique totale de l'Eco Ferme est de 234 379,15 kWh, ce qui correspond à un bilan carbone annuel de 168 987,37 gCO₂/kWh.

Lorsque nous ramenons ces résultats à des ratios de consommation électrique par mètre carré (par rapport à la surface des espaces consommateurs d'énergie = 3 344,58 m²) et de rejet de dioxyde de carbone par mètre carré (par rapport à la surface des espaces consommateurs d'énergie = 3 344,58 m²), nous trouvons respectivement 50,53 gCO₂/m²/kWh et 70,08 kWh/m².

Lorsque nous ramenons ces résultats à des ratios de consommation électrique par mètre carré (par rapport à la surface totale de l'Eco Ferme = 210 000 m²) et de rejet de dioxyde de carbone par mètre carré (par rapport à la surface totale de l'Eco Ferme = 210 000 m²), nous trouvons respectivement 0,8 gCO₂/m²/kWh et 1,12 kWh/m².

En supposant que par jour il y aura environ 30 visiteurs plus la vingtaine de salarié de la structure, ce qui équivaut à 18 250 ((30+20)*365) personnes dans l'année, nous aurons une consommation par personne d'environ 12,84 kWh/personne/an. Ce résultat est largement inférieur à la consommation électrique par habitant de La Réunion de 2016 qui est de 1,44 MWh/hab/an soit 1440 kWh/personne/an.

3.2.3.2.1 - Échelle journalière (Journée type)

Nous présentons ci-dessous, des sorties graphiques sur des journées se situant en été et hiver austral mais aussi sur un mois intermédiaire de la consommation électrique de l'Eco Ferme.

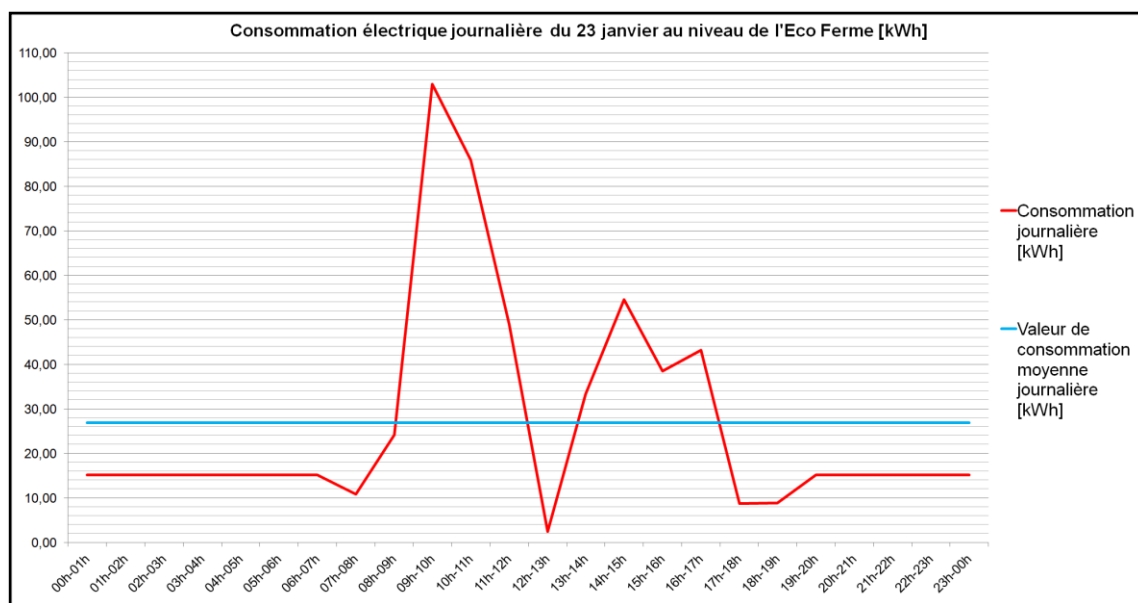


Figure 3.23 : Résultat de la consommation électrique d'une journée de Janvier sur l'Eco Ferme [kWh]

Nous remarquons sur ce graphique que la consommation électrique connaît son pic le matin vers 10h, ensuite, elle va redescendre lentement jusqu'à 12h avant de remonter jusqu'à 14h pour commencer une lente descente jusqu'à 17h et recommencer à augmenter légèrement pour recommencer une descente lente à partir de 18h jusqu'à vers 05h. Nous considérons que cette courbe sur la consommation électrique au niveau de l'Eco Ferme reflète la réalité du fonctionnement électrique. L'essentiel du travail consommatrice d'énergie est réalisé le matin en général. En effet, c'est au matin quand les employés, arrivant à leur lieu de travail, mettent en marche la majorité des équipements consommatrices d'électricité, que l'appel de puissance sera très important afin de permettre la mise en marche de ces derniers. En effet, un appareil consomme plus d'électricité pendant sa phase de mise en route que de fonctionnement. Dans ce cas le pic de consommation électrique de l'Eco Ferme est justifié. Dans l'après-midi entre 13h et 17h, nous remarquons aussi une consommation soutenue mais pas autant que pendant la matinée.

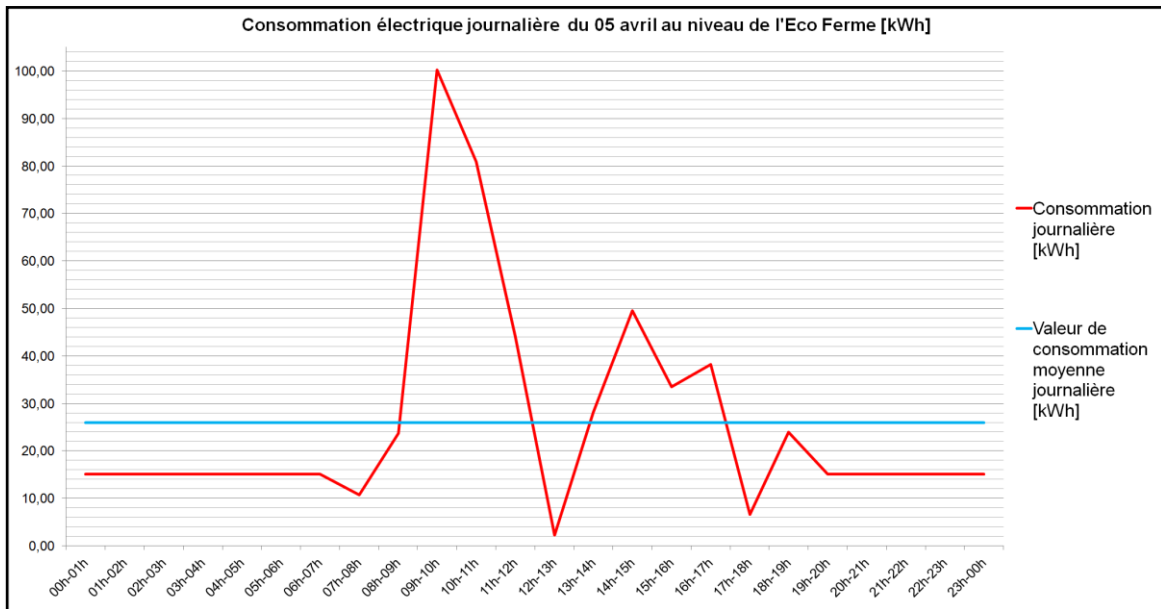


Figure 3.24 : Résultat de la consommation électrique sur une journée d'Avril sur l'Eco Ferme [kWh]

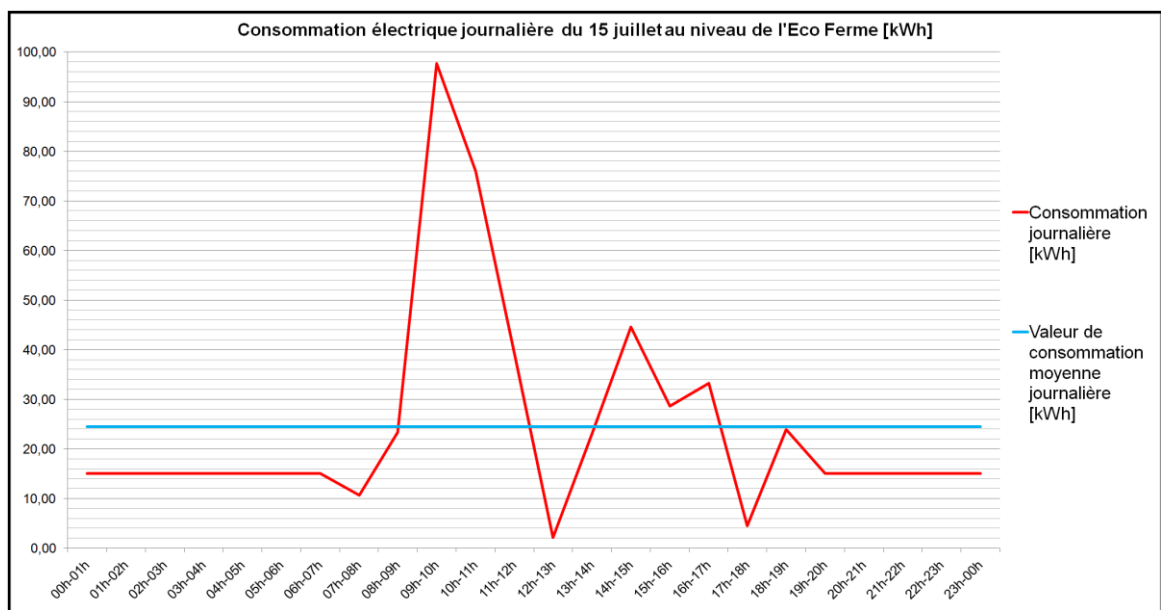


Figure 3.25 : Résultats de la consommation électrique sur une journée de juillet sur l'Eco Ferme [kWh]

Nous avons les mêmes profils de consommation sur les mois de janvier, avril et juillet au niveau l'Eco Ferme. Nous constatons que c'est au niveau de l'amplitude qu'il y a une différence. L'amplitude du mois d'avril est inférieure à celle de janvier et celle de juillet est inférieure de celle d'avril. Nous avons calculé les écarts sur les totaux de ces trois mois, et nous avons trouvé une baisse d'environ 3% entre janvier et avril, 6% entre avril et juillet et 9% entre janvier et juillet. Ces résultats sont cohérents par rapport aux facteurs d'usages et aux facteurs de pondération.

3.2.3.2.2 - Échelle hebdomadaire

Nous présentons ci-dessous, les résultats graphiques de la consommation électrique de l'Eco Ferme au niveau hebdomadaire pour les mêmes mois que précédemment. Nous avons fait le choix de ne pas toucher à l'échelle de l'axe des ordonnées afin de pouvoir visualiser l'écart-type réel entre les saisons.

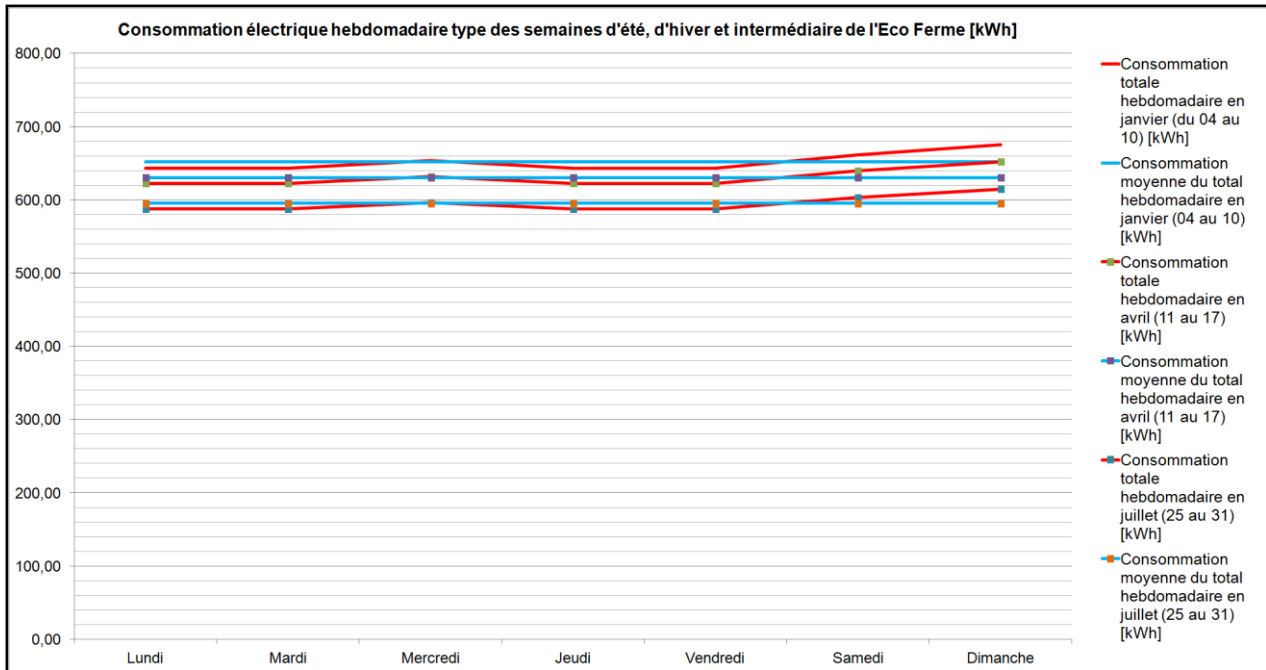


Figure 3.26 : Résultat de la consommation électrique hebdomadaire selon les saisons sur l'Eco Ferme [kWh]

Nous remarquons qu'à l'échelle hebdomadaire, la consommation électrique sur l'Eco Ferme varie que très légèrement du lundi au vendredi. Ce n'est que le mercredi où une légère hausse est constatée. Nous supposons que les pauses de mercredi des écoliers primaires seront une occasion pour les familles de sortir et venir à l'Eco Ferme. Par ailleurs, pour samedi et dimanche, il y a une nette hausse de la consommation. Cette différence entre les autres jours de la semaine par rapport à samedi et dimanche peut être expliquée par les hypothèses de fréquentation qui ont été définies. En effet, nous avons supposé que la fréquentation va en général augmenter le week-end, en particulier dimanche et potentiellement le mercredi car :

- L'Eco Ferme vise aussi un côté pédagogique. Pendant le week-end, en particulier le dimanche, les familles vont venir pour se promener et découvrir les lieux.
- Le mercredi les scolaires sont libres et peuvent venir avec un accompagnant pour des activités ludiques et pédagogiques. Et même les lycéens ou collégiens peuvent venir en groupe pour des sorties scolaires.

Pour le samedi, nous remarquons que la consommation électrique augmente par rapport aux autres jours de la semaine. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que pour le samedi, nous faisons l'hypothèse qu'il y aura des festivités et concerts prévu à l'Eco Ferme au niveau de l'espace bâti culturel sur certain week-end dans l'année. C'est ce qui peut expliquer cette augmentation le samedi.

Les variations des courbes des semaines pour les différentes saisons de l'année sont les mêmes, seule les amplitudes de consommation varient.

3.2.3.2.3 - Échelle mensuelle

Nous présentons ci-dessous les résultats graphiques de la consommation électrique de l'Eco Ferme à l'échelle mensuelle par rapport à une saison représentant l'été austral, l'hiver austral et une saison intermédiaire.

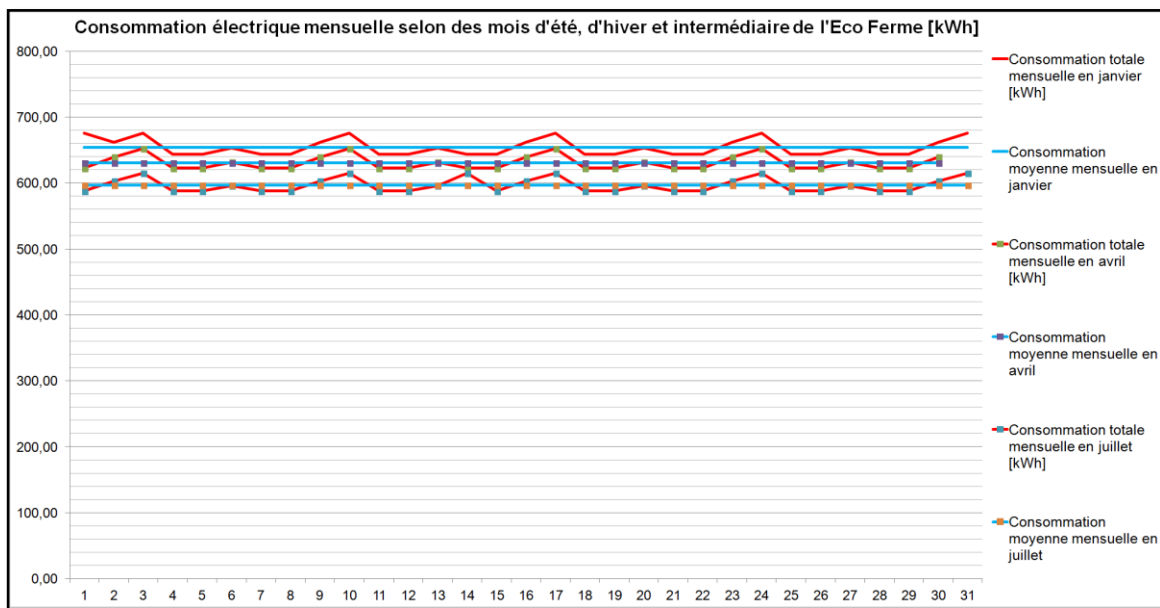


Figure 3.27 : Résultat de la consommation électrique mensuelle selon les saisons sur l'Eco Ferme [kWh]

Sur la consommation mensuelle, Nous pouvons faire les mêmes commentaires qu'à l'échelle hebdomadaire car la variation de la courbe de consommation électrique est la même. En effet, nous observons une consommation qui possède les mêmes caractéristiques et variations en début et fin de semaine scolaire, et une hausse les mercredis et week-end.

3.2.3.2.4 - Échelle annuelle

La Figure 3.28 ci-dessous, présente les résultats de la consommation électrique de l'Eco Ferme sur une année.

3.3 - SIMULATION DE LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE

3.3.1 - Démarches

La production électrique au niveau de l'Eco Ferme sera observée à partir du solaire photovoltaïque et du petit éolien.

L'installation des panneaux photovoltaïques est prévue sur quatre espaces bâtis de l'Eco Ferme qui sont :

- L'espace bâti ferme photovoltaïque, d'une superficie potentielle de 990 m².
- L'espace bâti Artisanal, d'une superficie potentielle de 120 m².
- L'espace bâti Recherche, d'une superficie potentielle de 210 m².
- L'espace bâti Voirie, d'une superficie potentielle de 900 m².

Nous avons donc une superficie potentielle totale de 2220 m² de capteurs solaires pour la production électrique au niveau de l'Eco Ferme. Ces surfaces sont susceptibles d'être diminuées en fonction des besoins électriques et du coût des installations.

L'installation des petits éoliens est prévue sur les hauteurs de la propriété.

Sur l'Eco Ferme, nous allons utiliser aussi un type d'énergie qui permet d'éviter une consommation sur le réseau pour ce besoin. En effet, nous allons installer des chauffe-eaux solaires, mais nous ne ferons pas l'analyse de ce système car il ne permet pas de produire de l'électricité au niveau de l'Eco Ferme. L'installation de chauffe-eau solaire est prévue sur quatre espaces bâtis qui sont :

- L'espace bâti gîte.
- L'espace bâti restauration.
- L'espace bâti habitation.
- L'espace bâti bungalow.

3.3.2 - Simulation de la production électrique par tranche horaire

3.3.2.1 - Données Météorologiques de la commune de Saint-Joseph

Pour des raisons d'ergonomie, nous donnons les données météorologiques sous forme de tableau au pas de temps mensuel car la présentation au pas de temps horaire ne sera pas lisible, en plus de prendre beaucoup d'espace.

Tableau 3.25 : Données météorologique mensuelle de Saint-Joseph

Date/Time	Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Monthly)	Environment:Site Wind Speed [m/s](Monthly)	Environment:Site Diffuse Solar Radiation Rate per Area [W/m2](Monthly)	Environment:Site Direct Solar Radiation Rate per Area [W/m2](Monthly)	Rayonnement global [W/m2](Monthly)
January	26,77	1,84	110,42	224,67	335,09
February	27,20	2,18	107,39	202,65	310,04
March	26,15	2,71	87,16	226,70	313,86
April	25,27	2,69	82,17	182,22	264,40
May	23,53	2,62	64,91	173,32	238,24
June	21,43	2,29	65,83	133,54	199,36
July	20,77	2,50	66,31	148,60	214,90
August	21,17	2,35	73,29	190,42	263,72
September	21,42	1,70	88,05	199,01	287,07
October	22,32	2,25	102,26	202,23	304,49
November	23,97	2,34	89,09	279,63	368,72
December	25,92	1,30	113,11	218,55	331,66
Total dans l'année			1050,01	2381,55	3431,55
Moyenne annuelle	23,83	2,23	87,50	198,46	285,96

Les données liées à la vitesse du vent et à l'ensoleillement sont représentées sur fond de couleur jaune.

3.3.2.2 - Production Photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques (PV) sont des systèmes qui permettent à partir de la lumière du soleil de produire de l'énergie électrique. Il repose sur la propriété de matériaux semi-conducteurs à générer de l'électricité à partir de l'énergie solaire.

La quantité d'énergie qui sera produite dépend de plusieurs facteurs notamment :

- Ensoleillement, car le PV a besoin de lumière pour produire de l'électricité et cette lumière provient principalement que du soleil
- Inclinaison des PV par rapport au soleil, en effet un PV disposé de manière perpendiculaire par rapport aux rayons lumineux du soleil captera davantage de rayons lumineux que le même PV disposée avec une inclinaison différente
- Qualité des matériaux, car la qualité du produit influencera grandement sur le rendement de captage des rayons lumineux
- Surface couverte, en effet plus la surface du PV sera grande plus la quantité des rayons captés sera élevée.

De manière générale, le rendement d'un panneau photovoltaïque dépend essentiellement de quatre facteurs énumérés ci-dessus. Ces facteurs influent directement sur le volume d'énergie qui sera produit par le PV, et plus ces facteurs seront élevés et plus la production sera importante et inversement.

Nous allons maintenant donner les relations qui permettent d'estimer la production électrique à partir des PV sur le site.

Nous avons déjà vu au chapitre 2, les équations mathématiques (Équation 2 et Équation 3) qui permettent d'estimer les productions à partir d'un PV et d'une éolienne.

Concernant, le cas d'étude de l'Eco ferme de Vincenzo, le choix sur les panneaux photovoltaïques se portera sur les modules polycristallins. En effet, ils présentent le meilleur rendement qualité-prix, de plus comme à La Réunion, il existe un très bon ensoleillement tout au long de l'année, ces performances seront très remarquables. Ils le seront d'autant que s'ils sont bien orientés, pour La Réunion l'inclinaison optimal est de 21°.

Par exemple, pour 3 kWc de production, la surface couverte de panneaux solaires sera de[78]:

- En monocristallin = 20 m² ;
- En polycristallin = 25m² ;
- En couche-mince = 40 m².

D'après cet exemple, nous constatons que le système PV le plus performant pour la production d'électricité solaire, tout en minimisant l'espace de captage des rayons lumineux, est le module photovoltaïque monocristallin, suivi du polycristallin et enfin du module en couche-mince. Cependant, à l'achat, il se trouve que le module monocristallin est beaucoup plus cher que le module polycristallin. C'est par ces caractéristiques très adaptées en milieu bien ensoleillé que le choix de panneau photovoltaïque se porte sur l'installation de module photovoltaïque polycristallin.

Au niveau du local technique pour la gestion de la production électrique originaire des P.V, nous allons avoir :

- Un Onduleur, qui permettra de transformer le courant continu en courant alternatif. C'est sur cet appareil que l'on va retrouver un interrupteur-sectionneur général et un disjoncteur en sortie de l'onduleur permettant de couper l'alimentation après l'onduleur;
- Des batteries pour pouvoir stocker l'électricité qui sera produit en surplus;
- Des compteurs, en effet on va avoir 2 compteurs distincts. Le premier servira pour effectuer le comptage de l'énergie fournie à l'utilisateur, et le second servira pour le comptage de l'énergie produite par l'utilisateur.

Au niveau de l'Eco Ferme, les données techniques des PV installés sont visualisables sur les figures ci-dessous.

Composant	Surface des capteurs solaires (m ²)	Puissance crête d'un capteur [Wc]	Nombre de capteurs	Orientation (en degré)	Inclinaison (en degré)	Coefficient de puissance de crête	Facteur de performance
MODULE POLYCRISTALLIN	100	230	4	0	21	0,15	0,75

Figure 3.29 : Données techniques des PV installés sur l'Eco Ferme

À partir de ces données et à l'aide des données météorologiques relatives à l'irradiation solaire au pas de temps horaire, nous avons évalué la production électrique du système photovoltaïque de l'Eco Ferme. Les résultats sont présentés ci-dessous sous forme de tableau.

Tableau 3.26 : Récapitulatif des données et des résultats des PV de l'Eco Ferme

Espace Bâti	Type de composant	Surface [m ²]	Production annuelle totale [kWh]
Ferme photovoltaïque	Module polycristallin	100	25 316,61
Total Eco Ferme	Module polycristallin	100	25 316,61

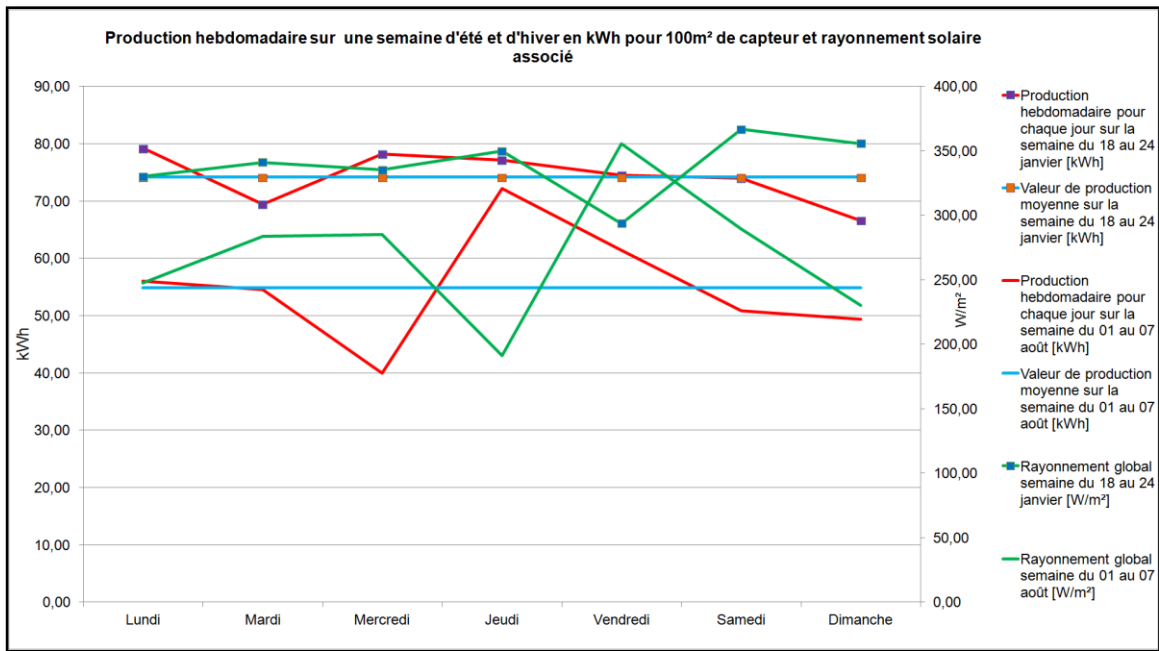
L'évaluation de la production électrique d'origine PV obtenue sur l'Eco Ferme sera d'environ de 25 316,61 kWh en restant sur les hypothèses de départ. Nous remarquons que cette production est largement inférieure à la consommation enregistrée au niveau de l'Eco Ferme qui se monte à 234 379,15 kWh dans l'année en prenant comme surface totale de production électrique à partir d'EnR 100m² de PV.

D'après les données météorologiques de St-Joseph à notre disposition, nous observons que la moyenne d'irradiation journalière est de 285,83 W/m²[79]. Nous avons un résultat qui coïncide à quelques centièmes près à cette moyenne. En effet, la journée du 02 août présente une irradiation de 285,36 W/m², nous allons donc effectuer une optimisation des surfaces de capteur en prenant la journée du 02 août comme le jour de référence afin que la production électrique puisse répondre à la consommation sur ce jour. Les résultats seront donnés au niveau de la section 3.4 système de pilotage. Pour information, le maximum d'irradiation journalière est de 467,32 W/m² relevée sur la journée du 24 octobre et le minimum est de 53,49 W/m² relevée sur la journée du 17 juillet. Nous avons calculé la moyenne sur une semaine et un mois, nous avons respectivement trouvé une moyenne de 169,39 W/m² et 285,96W/m². Ces données se rapprochent des données sur la semaine du 17 au 23 juillet et du mois de septembre.

Production sur une journée type d'été et d'hiver et rayonnement solaire associé

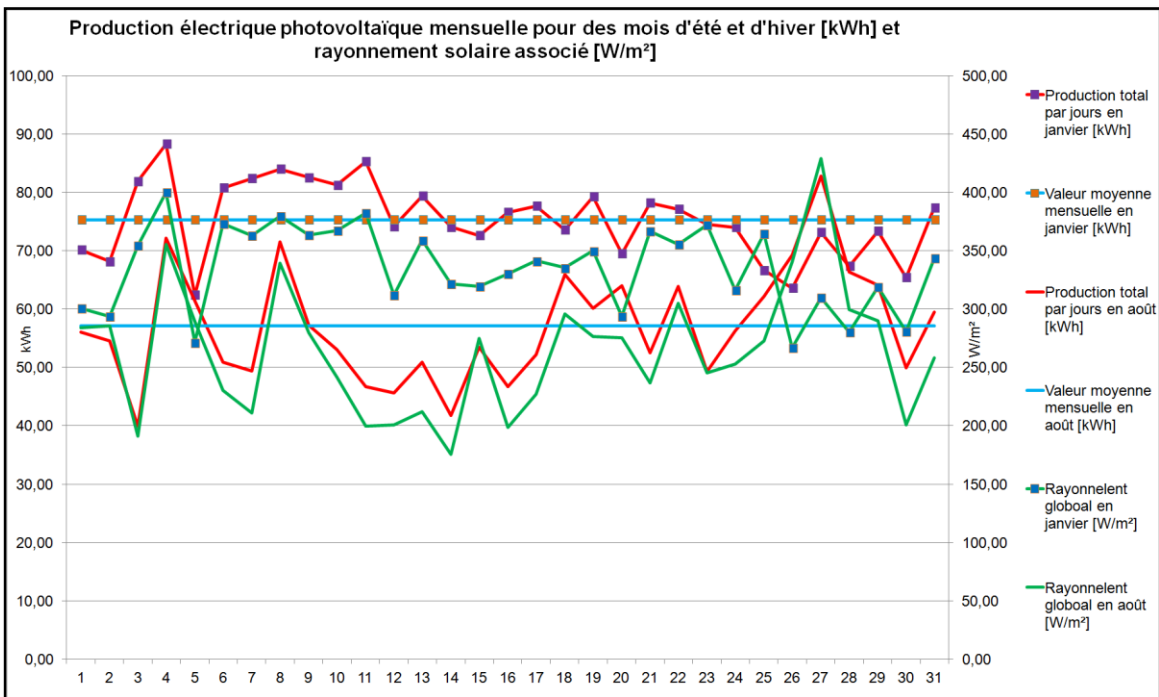


Production Semaine du 18 au 24 janvier et du 01 au 07 août ainsi que rayonnement solaire associé



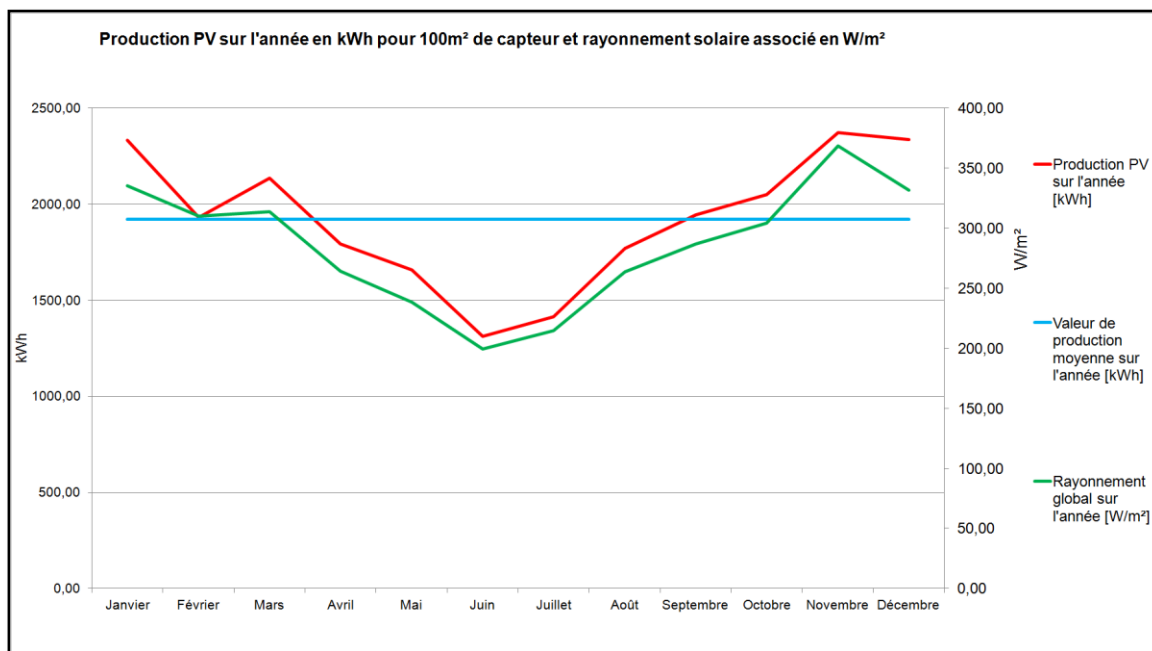
Production du mois de janvier et août ainsi que rayonnement solaire associé

▪ Ferme photovoltaïque



Production dans l'année

- Ferme photovoltaïque



Nous présentons un exemple de fichier horaire mensuel dans un mois pour la production EnR d'origine PV.

Tableau 3.27 : Exemple de fichier pour un mois complet

	Jour	06h-07h	07h-08h	08h-09h	09h-10h	10h-11h	11h-12h	12h-13h	13h-14h	14h-15h	15h-16h	16h-17h	17h-18h	18h-19h	19h-20h	Total	Moyenne
JANVIER	1	0,26	1,50	3,18	5,65	7,75	9,81	10,03	8,56	7,47	5,98	4,41	3,36	1,73	0,42	70,11	5,01
	2	0,23	1,52	3,58	6,50	8,03	8,01	7,99	8,10	7,81	6,67	4,51	3,03	1,74	0,44	68,14	4,87
	3	0,25	1,91	5,38	7,97	10,16	11,42	9,89	10,17	8,80	6,63	4,58	3,08	1,44	0,31	81,90	5,85
	4	0,18	1,57	5,06	7,50	10,85	12,08	12,09	11,29	9,05	7,16	5,50	3,67	1,78	0,51	88,29	6,31
	5	0,12	1,24	2,91	5,27	7,16	7,16	6,91	7,36	7,55	6,39	4,59	3,44	1,80	0,50	62,39	4,46
	6	0,17	1,99	5,73	8,62	9,10	10,30	9,85	8,56	7,80	6,98	5,55	3,70	1,87	0,50	80,72	5,77
	7	0,17	1,84	4,51	8,14	10,02	11,53	11,04	9,95	8,08	6,71	4,98	3,20	1,81	0,44	82,41	5,89
	8	0,12	1,61	5,23	7,67	10,25	11,35	11,08	10,41	8,08	6,77	5,44	3,67	1,81	0,44	83,97	6,00
	9	0,13	1,66	4,38	7,00	10,23	11,63	11,75	9,90	8,30	6,74	5,27	3,44	1,71	0,40	82,55	5,90
	10	0,14	1,46	4,09	8,11	9,91	10,19	10,63	9,60	8,84	6,94	5,45	3,63	1,79	0,48	81,26	5,80
	11	0,13	1,50	4,49	8,46	11,59	12,13	10,97	10,34	8,10	6,41	5,17	3,57	1,89	0,51	85,27	6,09
	12	0,11	1,18	3,40	6,96	9,36	11,17	10,21	9,19	7,42	5,93	4,56	2,77	1,42	0,46	74,16	5,30
	13	0,15	1,76	5,05	6,87	9,56	10,14	10,50	9,60	7,86	6,87	5,02	3,63	1,85	0,53	79,38	5,67
	14	0,11	1,31	3,85	6,29	9,36	9,96	9,79	8,73	7,77	6,34	5,11	3,37	1,63	0,40	74,04	5,29
	15	0,08	0,96	2,93	5,41	7,73	9,28	10,67	10,01	7,93	6,70	5,27	3,51	1,71	0,44	72,62	5,19
	16	0,13	1,51	4,63	7,85	8,93	9,60	10,46	9,96	7,83	6,19	4,45	3,11	1,46	0,45	76,57	5,47
	17	0,12	1,38	4,01	7,42	9,80	10,52	10,35	8,71	8,27	6,75	4,77	3,41	1,73	0,39	77,61	5,54
	18	0,07	1,03	3,47	5,41	7,47	9,67	10,19	10,04	8,13	6,94	5,04	3,69	1,90	0,51	73,57	5,28
	19	0,13	1,65	5,45	9,13	10,67	10,45	9,74	8,53	7,45	6,06	4,43	3,18	1,63	0,51	78,23	5,68
	20	0,08	1,09	3,77	6,01	7,68	9,42	10,15	9,58	7,35	6,23	4,38	2,76	1,51	0,48	69,47	4,98
	21	0,08	0,97	3,23	7,06	8,28	9,53	10,08	10,76	9,33	7,19	5,60	3,67	1,90	0,50	78,18	5,58
	22	0,12	1,47	3,96	6,07	8,00	9,89	10,29	10,14	8,66	7,36	5,22	3,56	1,88	0,50	77,12	5,51
	23	0,07	1,01	3,61	5,47	7,45	8,76	9,95	10,01	9,36	7,88	5,69	3,96	1,82	0,45	74,50	5,32
	24	0,10	1,33	4,46	8,00	9,65	11,02	10,13	8,37	6,91	4,89	4,05	3,01	1,61	0,48	74,02	5,29
	25	0,09	1,18	3,67	6,02	9,44	9,97	9,23	8,29	7,12	5,54	3,75	1,87	0,49	0,00	66,64	4,76
	26	0,10	1,45	4,67	6,25	7,58	8,57	8,00	7,43	6,63	5,13	3,69	2,29	1,36	0,41	63,59	4,54
	27	0,09	1,26	4,12	6,82	8,81	10,69	9,85	9,78	8,01	5,76	4,09	2,57	1,07	0,24	73,17	5,23
	28	0,00	1,14	3,88	5,94	7,84	9,96	10,16	8,70	7,05	4,82	3,53	2,68	1,28	0,36	67,36	4,81
	29	0,00	1,06	3,37	7,02	9,30	9,72	9,55	9,01	8,08	6,46	4,66	3,00	1,68	0,50	73,32	5,24
	30	0,00	1,16	3,47	5,99	7,80	7,98	8,31	8,27	8,39	6,08	4,34	3,23	1,95	0,39	65,44	4,67
	31	0,00	1,27	4,16	7,07	9,28	10,45	10,59	9,48	8,11	6,57	4,98	3,30	1,71	0,43	77,39	5,63
	Total	3,54	42,85	127,80	213,96	278,99	312,46	309,44	287,83	246,08	198,94	148,06	100,35	50,73	13,36	2394,99	5,38
	Moyenne	0,11	1,38	4,12	6,90	9,00	10,08	9,98	9,28	7,94	6,42	4,78	3,24	1,64	0,43		5,38

3.3.2.3 - Production Éolienne

Pour l'éolien, comme il a été noté sur le site internet de l'Eco Ferme[65], le choix a été fait de se baser sur l'installation des petits éoliens à titre pédagogique. En effet, les petits éoliens contrairement aux grandes éoliennes ne nécessitent pas de permis de construire avant l'installation, ensuite elles sont bien adaptées à un usage personnel et il existe un large panel de petits éoliens adaptés aux besoins et aux budgets de chacun selon le projet visé.

La catégorie de petit éolien regroupe un large spectre de machines qui se définissent par leur puissance :

- Le **micro-éolien**, qui est une machine d'une puissance inférieure à 1kW;
- Le **petit éolien** qui représente des machines dont la puissance est comprise entre 1kW et 36kW;
- Le **moyen éolien** qui regroupe des machines dont la puissance se trouve entre 36kW et 250kW.

Pour notre cas, compte tenu de l'insularité de l'île, nous allons plutôt privilégier l'installation d'une éolienne à axe horizontal tripale car elle offre de meilleures performances et en plus ce type d'éolienne étant plus répandue, trouver un vendeur ou un installateur sera beaucoup plus aisé. En effet, ce type d'éolienne offre le meilleur rendement qualité-prix car elle capte le maximum d'énergie par sa capacité à s'orienter d'elle-même pour s'adapter à la direction du vent.

Les éoliennes de l'Eco Ferme auront une petite dimension[80], par souci d'espace, de coût d'investissement et pour faciliter les démarches administratives qui sont très draconiennes pour l'installation d'éolienne. Elle servira prioritairement à combler le côté pédagogique de la ferme, à montrer qu'il existe plusieurs sources d'énergies renouvelables. Cependant, la production électrique produite par ces petites éoliennes sera consommée localement sur le site. Pour information, les petites éoliennes seront installées sur les hauteurs de la propriété à côté de la vigne maronne car c'est l'espace le plus en hauteur du site afin de bénéficier au maximum du vent.

La loi de Betz, vu au chapitre 2, permet d'estimer la puissance maximum récupérable d'une éolienne à l'aide de l'Équation 3.

Au niveau de l'Eco Ferme, les données techniques des petites éoliennes sont données au niveau de la Figure 3.30 ci-dessous.

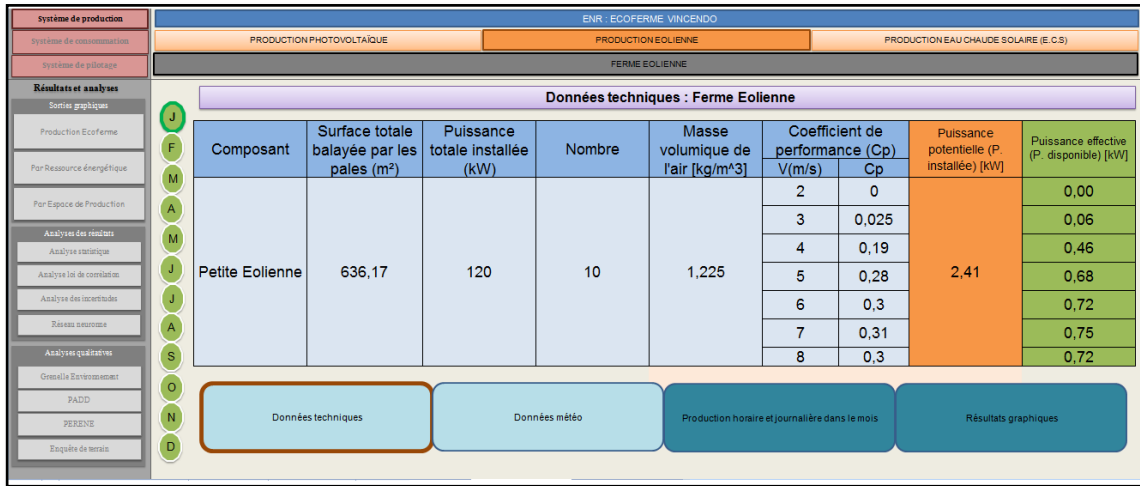
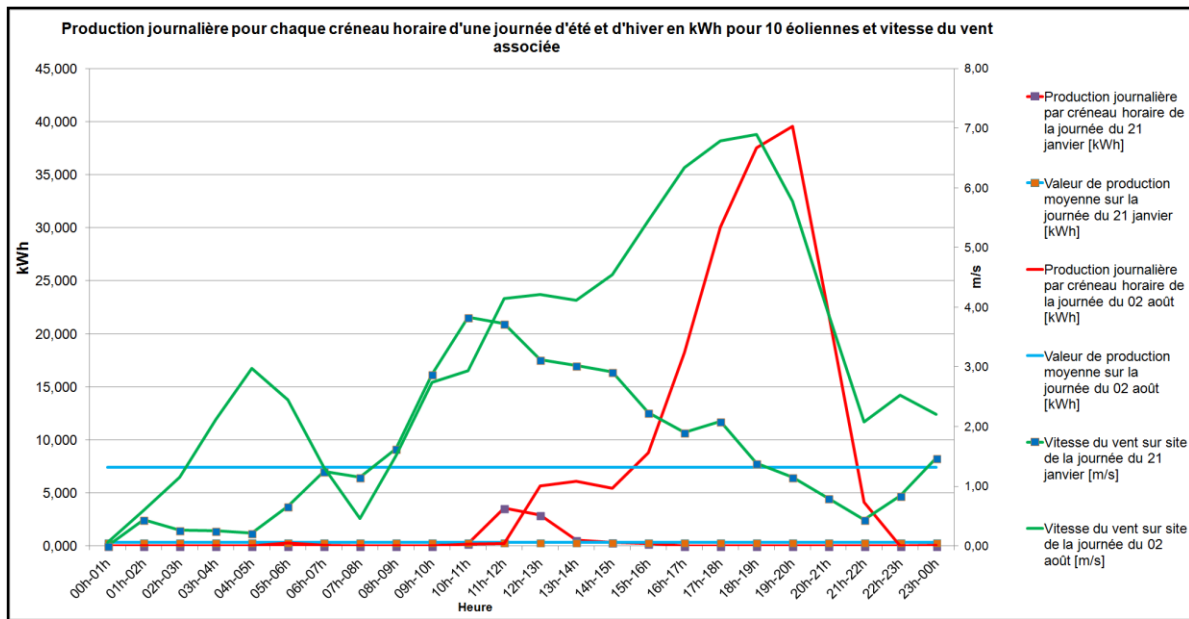


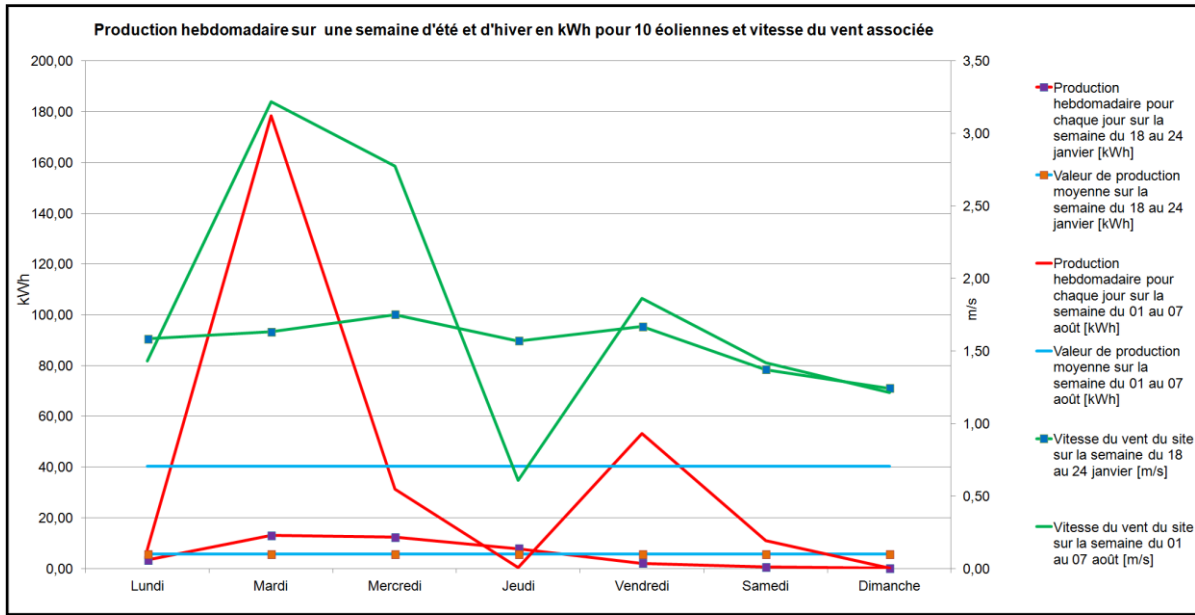
Figure 3.30 : Données techniques des éoliennes installées sur l'Eco Ferme

À partir de ces données et à l'aide des données météorologiques relatives à la vitesse du vent au pas de temps horaire, nous avons évalué la production électrique des différentes éoliennes situées sur l'Eco Ferme. Nous avons trouvé une production électrique annuelle de 20 848,11 kWh. Ce résultat est à prendre avec précaution car, nous n'avons pas pris en compte le relief de l'environnement du site.

Production sur une journée type d'été et d'hiver et vitesse de vent associée

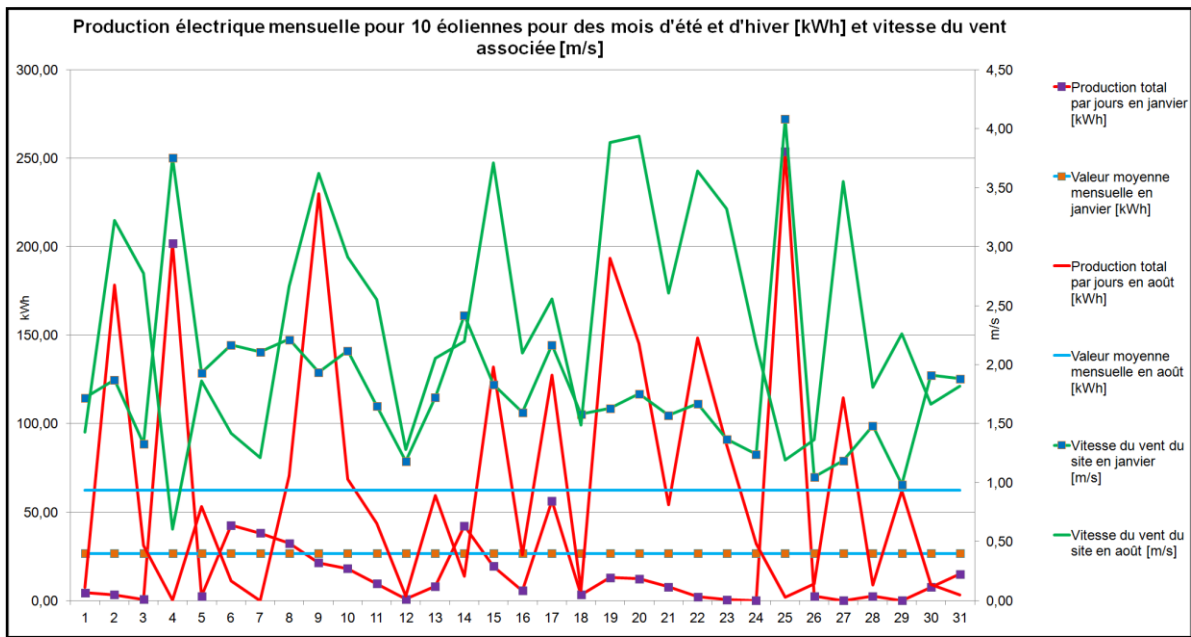


Production Semaine du 18 au 24 janvier et du 01 au 07 août ainsi que vitesse de vent associée



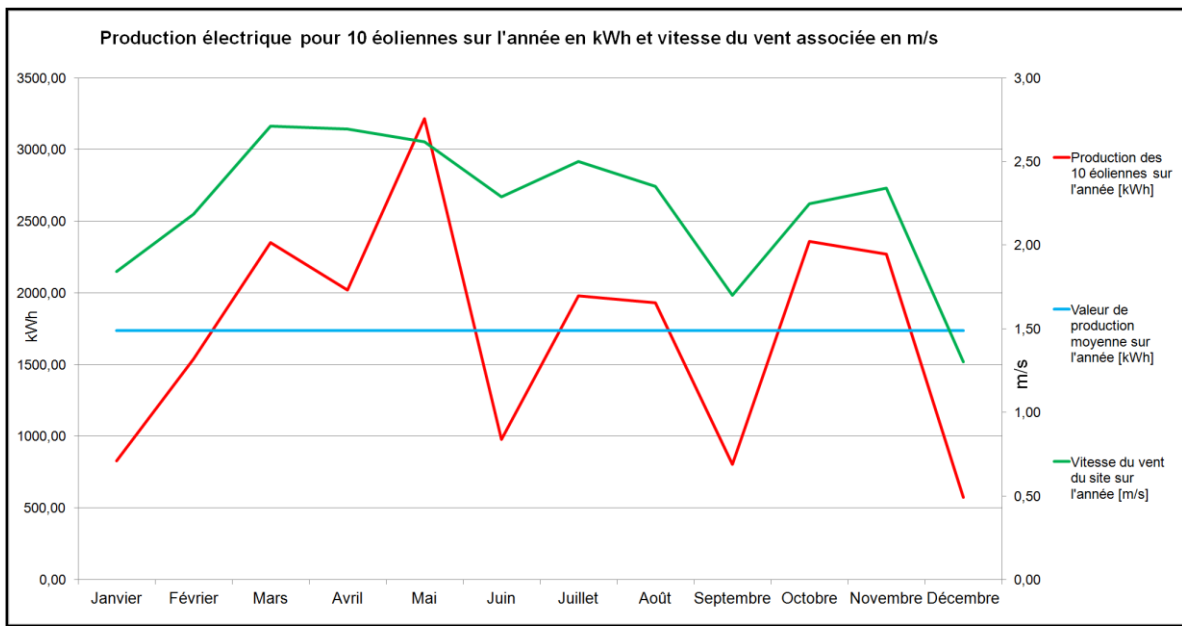
Production du mois de janvier et août ainsi que vitesse de vent associée

▪ Éolienne



Production dans l'année

- Éoliennes



Nous présentons un exemple de fichier horaire mensuel dans un mois pour la production EnR d'origine éolienne pour l'Eco Ferme.

Tableau 3.28 : Exemple de fichier pour un mois complet sur la production éolienne de l'Eco Ferme [kWh]

Jour	00h-01h	01h-02h	02h-03h	03h-04h	04h-05h	05h-06h	06h-07h	07h-08h	08h-09h	09h-10h	10h-11h	11h-12h	12h-13h	13h-14h	14h-15h	15h-16h	16h-17h	17h-18h	18h-19h	19h-20h	20h-21h	21h-22h	22h-23h	23h-00h	Total	Moyenne
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,079	0,079	0,139	0,186	1,489	2,316	0,130	0,051	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,48	0,19
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,24	0,13
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,61	0,03
4	0,741	0,000	0,042	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,054	5,919	23,848	26,373	24,717	21,058	16,070	19,981	22,177	13,753	11,154	7,007	3,435	2,442	2,254	0,341	201,99	8,42
5	0,000	0,130	0,051	0,078	0,028	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,118	0,143	0,152	0,118	0,176	0,886	0,314	0,147	0,114	0,070	0,015	0,000	0,000	0,000	2,54	0,11
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,122	3,357	9,859	12,869	7,007	3,840	10,43	0,886	1,905	1,441	0,147	0,099	0,001	0,000	0,000	42,58	1,77
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,019	3,593	12,423	8,454	7,104	3,435	2,506	0,368	0,143	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	38,06	1,59
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,231	3,057	6,091	4,456	6,912	5,188	1,850	1,639	2,076	0,639	0,099	0,082	0,070	0,000	0,000	0,000	32,39	1,35
9	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,143	3,675	6,443	2,637	2,913	5,424	1,743	0,092	0,018	0,056	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	21,25	0,89
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,776	6,447	5,750	1,394	2,254	0,963	0,214	0,244	0,049	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	18,10	0,75
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,706	4,885	2,571	0,963	0,208	0,134	0,030	0,012	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	9,52	0,40
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,103	0,288	0,067	0,064	0,250	0,064	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,84	0,03
13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,051	1,003	0,314	0,849	3,435	2,076	0,089	0,056	0,220	0,056	0,000	0,000	0,000	0,000	8,15	0,34
14	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,110	2,773	10,622	11,428	8,454	5,266	0,808	0,741	2,076	0,143	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,25	1,76
15	0,000	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	1,441	2,842	5,750	6,917	1,598	0,943	0,167	0,162	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	19,34	0,81
16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,093	0,176	1,084	3,057	1,163	0,049	0,000	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,61	0,23
17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,493	9,993	11,154	14,456	7,915	1,796	0,741	0,079	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,29	2,35
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,231	0,324	1,043	0,197	0,056	0,000	0,000	0,000	0,000	3,32	0,14
19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,070	1,347	4,185	2,378	3,993	1,212	0,186	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,98	0,54
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,047	0,118	2,316	3,675	3,925	1,796	0,114	0,126	0,244	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,38	0,52
21	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,203	2,593	2,913	0,543	0,314	0,220	0,028	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,82	0,33
22	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,051	0,220	0,126	0,482	0,314	0,225	0,543	0,096	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,08	0,09
23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,52	0,02
24	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,04	0,00
25	0,000	0,000	0,007	0,073	0,009	0,026	0,028	0,070	2,773	12,719	27,895	29,334	35,122	38,865	30,069	21,853	19,981	20,746	10,235	2,254	1,493	0,395	0,036	0,000	253,8	10,57
26	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,157	1,212	0,886	0,192	0,051	0,030	0,000	0,000	0,000	0,000	2,53	0,11
27	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,02	0,00
28	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,092	0,099	0,214	1,126	0,452	0,186	0,059	0,079	0,096	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,40	0,10
29	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00
30	0,000	0,049	0,118	0,028	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,122	0,231	0,118	0,263	2,316	2,844	1,126	0,220	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,59	0,32
31	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,395	2,194	3,130	3,757	3,205	1,598	0,512	0,190	0,038	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	14,96	0,62
Total	0,767	0,192	0,218	0,201	0,037	0,026	0,028	0,070	2,906	19,528	72,612	133,757	139,769	133,577	112,571	69,535	52,539	43,999	24,935	9,743	5,139	2,908	2,352	0,355	827,76	1,113
Moyenne	0,025	0,006	0,007	0,006	0,001	0,001	0,001	0,002	0,094	0,630	2,342	4,315	4,509	4,309	3,631	2,243	1,695	1,419	0,804	0,314	0,166	0,094	0,076	0,011	1,113	

Tableau 3.29 : Exemple tableau fichier de la production totale d'électricité d'origine EnR (PV + éolienne) en kWh

Consommation totale de l'EcoFerme au mois de Janvier [kWh]																										
JOUR JULIEN	00h-01h	01h-02h	02h-03h	03h-04h	04h-05h	05h-06h	06h-07h	07h-08h	08h-09h	09h-10h	10h-11h	11h-12h	12h-13h	13h-14h	14h-15h	15h-16h	16h-17h	17h-18h	18h-19h	19h-20h	20h-21h	21h-22h	22h-23h	23h-00h	Total	Moyenne
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,03	6,00	12,79	22,66	31,13	33,43	41,63	36,58	30,03	23,36	17,65	13,45	6,34	1,67	0,00	0,00	0,00	0,00	234,33	11,87
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82	6,07	14,31	25,38	32,16	32,63	32,33	32,65	31,31	26,81	18,80	12,34	6,39	1,80	0,02	0,00	0,00	0,00	275,81	11,44
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	7,63	21,51	31,89	40,68	45,80	33,59	40,79	35,55	26,13	18,31	12,31	5,78	1,24	0,00	0,00	0,00	0,00	328,21	13,43
4	0,74	0,00	0,04	0,02	0,00	0,00	0,73	6,30	20,31	35,31	67,23	75,30	73,09	66,24	52,28	48,61	44,17	28,43	18,27	9,03	3,43	2,44	2,25	0,34	555,17	23,40
5	0,00	0,13	0,05	0,08	0,03	0,00	0,48	4,37	11,63	21,07	28,74	28,80	27,77	23,56	30,38	26,44	18,66	13,90	7,32	2,07	0,01	0,00	0,00	0,00	252,10	10,59
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63	7,96	22,94	34,62	39,75	51,08	52,26	41,23	35,06	28,96	23,10	16,69	8,90	2,14	0,10	0,00	0,00	0,00	365,43	15,23
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	7,35	18,04	32,59	43,67	58,54	52,62	46,89	35,76	29,33	20,28	12,93	7,25	1,77	0,00	0,00	0,00	0,00	367,71	15,32
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	6,44	21,02	30,90	44,07	51,43	46,76	45,35	31,49	28,93	23,41	16,74	7,89	1,86	0,08	0,07	0,00	0,00	368,27	15,34
9	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	6,24	17,52	28,14	44,78	51,41	49,62	42,51	39,64	28,72	21,17	13,76	6,88	1,62	0,00	0,00	0,00	0,00	351,53	14,45
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	5,83	16,37	32,47	40,41	47,21	48,23	33,78	37,61	23,74	22,01	14,76	7,20	1,90	0,00	0,00	0,00	0,00	343,12	14,29
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	5,99	17,97	33,84	47,05	53,42	46,46	42,33	32,62	25,77	20,71	14,31	7,56	2,05	0,00	0,00	0,00	0,00	350,60	14,41
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	4,74	13,62	27,86	37,46	44,79	41,13	36,83	23,75	23,96	18,31	11,08	5,67	1,86	0,00	0,00	0,00	0,00	297,47	12,57
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	7,05	20,18	27,46	38,30	41,58	42,31	39,25	34,88	29,57	20,17	14,58	7,60	2,16	0,00	0,00	0,00	0,00	325,68	15,87
14	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	5,24	15,40	25,29	40,22	50,48	50,59	43,38	36,36	25,38	21,19	15,54	6,67	1,61	0,00	0,00	0,00	0,01	338,42	14,19
15	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	3,84	11,74	21,63	30,96	38,56	45,50	45,78	38,54	28,38	21,60	14,20	7,00	1,76	0,00	0,00	0,00	0,00	309,83	12,91
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	6,05	18,54	31,42	35,79	38,57	42,94	42,30	32,48	24,82	17,78	12,47	5,83	1,80	0,00	0,00	0,00	0,01	311,90	13,46
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	5,51	16,02	29,63	40,69	50,76	51,59	45,38	47,52	34,30	20,69	14,38	6,38	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00	366,73	15,27
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	4,11	13,83	21,64	29,87	38,76	40,83	40,66	32,72	28,00	21,07	15,82	7,73	2,10	0,00	0,00	0,00	0,00	297,61	12,40
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	6,59	21,92	36,51	42,76	43,14	43,13	36,43	33,39	25,45	17,92	12,74	7,32	2,02	0,00	0,00	0,00	0,00	323,88	13,75
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	4,35	15,08	24,09	30,84	39,38	44,27	38,25	31,21	25,02	17,63	11,27	6,07	1,90	0,00	0,00	0,00	0,00	290,27	12,49
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	3,86	12,92	28,25	33,33	41,71	43,23	41,07	37,65	28,99	22,41	14,63	7,61	1,99	0,00	0,00	0,00	0,00	320,54	13,34
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	5,87	15,84	24,28	32,05	39,80	41,30	43,03	34,94	23,65	21,42	14,32	7,54	2,01	0,00	0,00	0,00	0,00	310,55	12,44
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	4,04	14,43	21,30	28,79	35,04	35,82	40,11	37,50	31,63	22,80	15,85	7,45	1,82	0,00	0,00	0,06	0,00	298,50	12,44
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	5,34	17,83	31,38	38,60	44,09	40,50	33,50	27,69	19,57	16,22	12,05	6,42	1,91	0,00	0,00	0,00	0,00	296,12	12,34
25	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,03	0,39	4,78	17,44	36,79	65,43	69,21	72,02	72,01	58,58	43,99	34,98	28,21	12,21	2,25	1,49	0,40	0,04	0,00	520,34	21,41
26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	5,81	16,70	25,02	30,34	34,23	32,00	29,88	21,73	21,40	14,94	9,22	5,49	1,65	0,00	0,00	0,00	0,00	256,88	10,79
27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38	5,05	16,49	27,26	35,24	42,78	39,38	39,11	32,05	23,03	16,37	10,31	4,21	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	292,69	12,29
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,56	15,90	23,78	31,47	39,96	40,84	39,95	29,67	19,48	14,18	10,80	5,22	1,44	0,00	0,00	0,00	0,00	271,94	11,33
29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	4,23	13,49	28,08	36,82	38,88	38,26	36,05	32,31	25,83	18,63	12,01	6,70	1,98	0,00	0,00	0,00	0,00	252,26	12,22
30	0,00	0,05	0,12	0,03	0,00	0,00	0,00	4,61	13,89	24,09	31,44	32,05	33,52	35,38	30,59	25,38	17,56	12,32	6,19	1,57	0,00	0,00	0,00	0,00	269,34	11,22
31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,09	16,66	28,28	37,52	44,01	45,50	41,68	35,64	27,87	20,41	13,31	6,87	1,70	0,00	0,00	0,00	0,00	324,53	11,52
Total	0,77	0,19	0,22	0,20	0,04	0,03	14,17	171,49	514,09	875,37	1189,59	1383,61	1377,53	1284,88	1096,87	865,30	644,79	445,40	227,87	63,19	5,14	2,31	2,35	0,35	10165,94	
Moyenne	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,46	5,53	16,58	28,24	38,34	44,63	44,44	41,45	35,38	27,91	20,80	14,37	7,35	2,04	0,17	0,09	0,08	0,01		

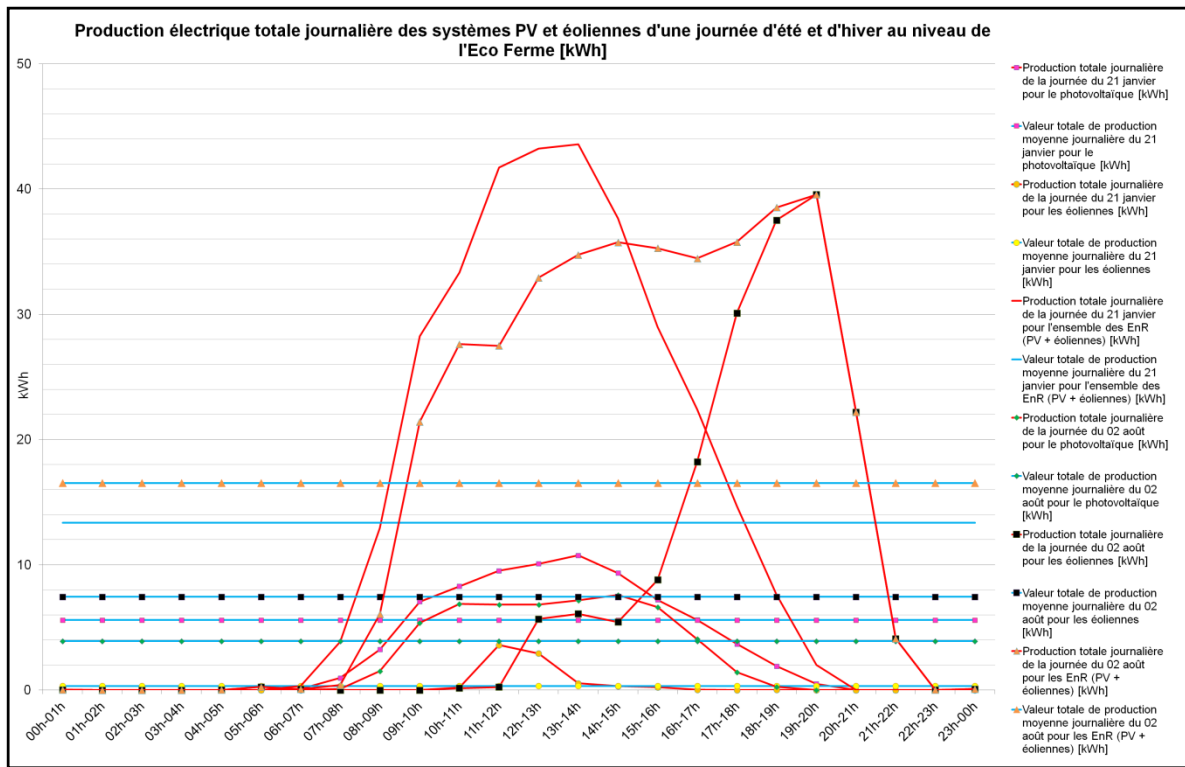


Figure 3.31 : Exemple de courbe de production des EnR sur l'Eco Ferme sur une journée d'été et d'hiver [kWh]

Le Tableau 3.30 résume les besoins et les productions EnR annuelles de l'Eco Ferme.

Tableau 3.30 : Récapitulatif des résultats au niveau de l'Eco Ferme

Système d'espace bâti	Consommation [kWh]	Production [kWh]	Différence [kWh]
Eco Ferme	234 379,15	46165,02	188 214,13

3.4 - SYSTÈME DE PILOTAGE DE LA DISTRIBUTION D'EnR SUR L'ECO FERME DE VINCENDO

3.4.1 - Principe de fonctionnement

Nous rappelons que l'objectif du pilotage de la distribution n'est pas d'assurer un taux de couverture des besoins en consommation et donc de permettre des économies au niveau du consommateur, mais de lisser dans la mesure du possible la courbe de charge afin de minimiser les coûts de production. Il ne s'agit pas de minimiser la totalité du soutirage réseau, mais de minimiser le soutirage réseau lors des pics de consommation en ayant au préalable définie un seuil à ne pas dépasser au niveau du soutirage réseau.

Nous nous proposons dans ce chapitre d'expérimenter et d'ajuster les algorithmes de distribution pour répondre à ces objectifs sur un territoire très réduit : l'Eco Ferme de Vincendo, avant d'appliquer l'Outil à un territoire plus conséquent sur le Département de Mayotte.

Nous avons présenté au chapitre 2 l'Outil de pilotage de distribution d'EnR, autour des algorithmes de simulation des distributions associés aux situations de fonctionnement du système électrique comprenant :

- Le système de production d'EnR;
- Le système de consommation;
- Le système de stockage;
- Le réseau électrique du territoire associé.

Nous avons, dans un premier temps, deux paramètres structurels à déterminer, à savoir, la capacité de production d'EnR et la capacité de stockage d'énergie électrique.

La capacité de production sera déterminée en lien avec :

- Les données météorologiques;
- Les dimensionnements des installations photovoltaïques et éoliennes;
- Et les besoins du système de consommation.

Nous nous plaçons dans une situation où la production éolienne constituera la base de production où nous ne prenons en compte que des données économiques pour fixer le nombre d'éoliennes que nous installerons sur le site. La production d'EnR correspondante sera bien au deçà des besoins de consommation du site.

La capacité de production d'EnR sera ajusté pour l'essentiel à partir des installations photovoltaïques et donc du rayonnement solaire

Pour ajuster consommation et production nous observerons leurs valeurs moyennes. L'idéal est d'avoir ces valeurs moyennes au même niveau. Nous nous référons à trois journées météorologiques types pour ajuster la capacité de production d'EnR :

- Une journée type favorable correspondant à un rayonnement solaire maximal sur l'année;
- Une journée type défavorable correspondant à un rayonnement solaire minimal sur l'année;
- Une journée type moyenne correspondant à un rayonnement solaire moyen.

Nous observerons donc les valeurs moyennes de production sur ces 3 journées types que nous comparerons avec les valeurs moyennes des consommations pour les mêmes jours d'observation. La surface de panneaux photovoltaïques sera déterminée sur une journée type favorable.

Nous observerons par la suite les taux de couverture moyen des besoins de consommation sur les 3 journées types afin de bien situer les paramètres de fonctionnement que nous retenons.

Le pilotage de la distribution d'EnR se fait au pas de temps horaire sur une journée d'observation.

Pour affiner nos observations, nous pourrions mettre en œuvre des simulations à l'échelle hebdomadaire, mensuelle et annuelle.

Le deuxième paramètre structurel, c'est-à-dire la capacité de stockage, sera déterminé sur la journée type favorable autour de la production d'EnR, mais également sur les amortissements des pics de charge et donc sur une journée type de consommation correspondant à une journée défavorable concernant les pics de charge. Ces journées les plus défavorables s'observent de manière récurrente au niveau des jours de semaine du lundi au vendredi.

Ces deux paramètres structurels pour un site donné, ne sont, bien entendu, pas variables. Dispositifs de production et de stockage font l'objet d'investissements qui sont déterminés a priori et n'évoluent plus une fois les dimensionnements arrêtés. Nous pouvons donc jouer sur deux autres paramètres fonctionnels variables selon les situations pour tenter de minimiser les soutirages réseau lors des pics de charges : Les limites hautes et basses du stockage afin de garder des réserves suffisantes pour pouvoir assurer une alimentation du système de consommation lors des pics de charge.

Nous nous basons sur le schéma simplifié ci-dessous afin d'assurer le pilotage au niveau du site.

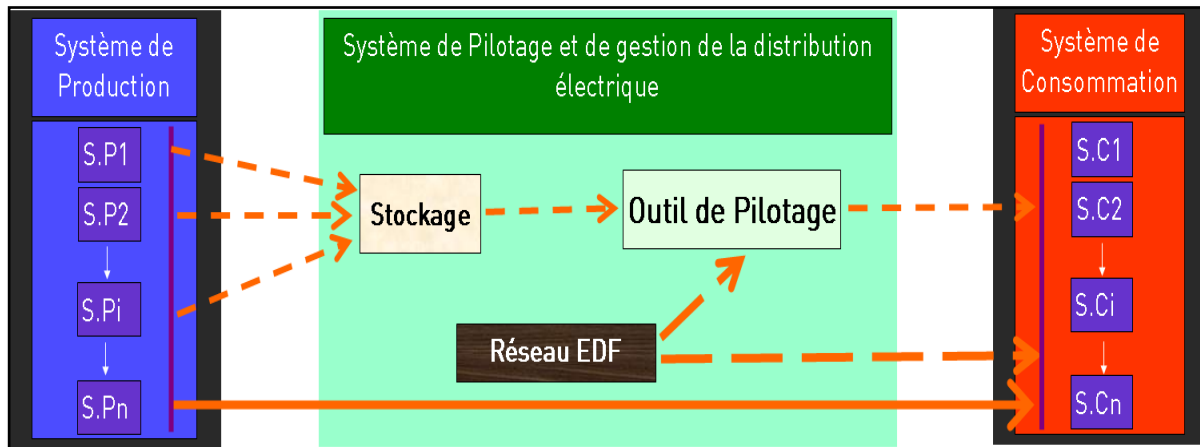


Figure 3.32 : Schéma simplifié du principe de gestion de la distribution électrique sur un système d'espace bâti

Le stockage est utilisé pour palier aux fluctuations de puissance à court ou moyen terme sur le site d'étude. Nous avons fait le choix d'utiliser des batteries solaires avec régulateur solaire sur le site. Au niveau du régulateur, nous allons réguler la charge de la batterie, qui ne doit pas dépasser 80%, ni ne doit descendre sous les 50% de décharge. En effet, une surcharge comme une décharge trop profonde endommage les batteries et diminue sensiblement leur durée de vie.

La Figure 3.33 ci-dessous donne des renseignements à ce propos.

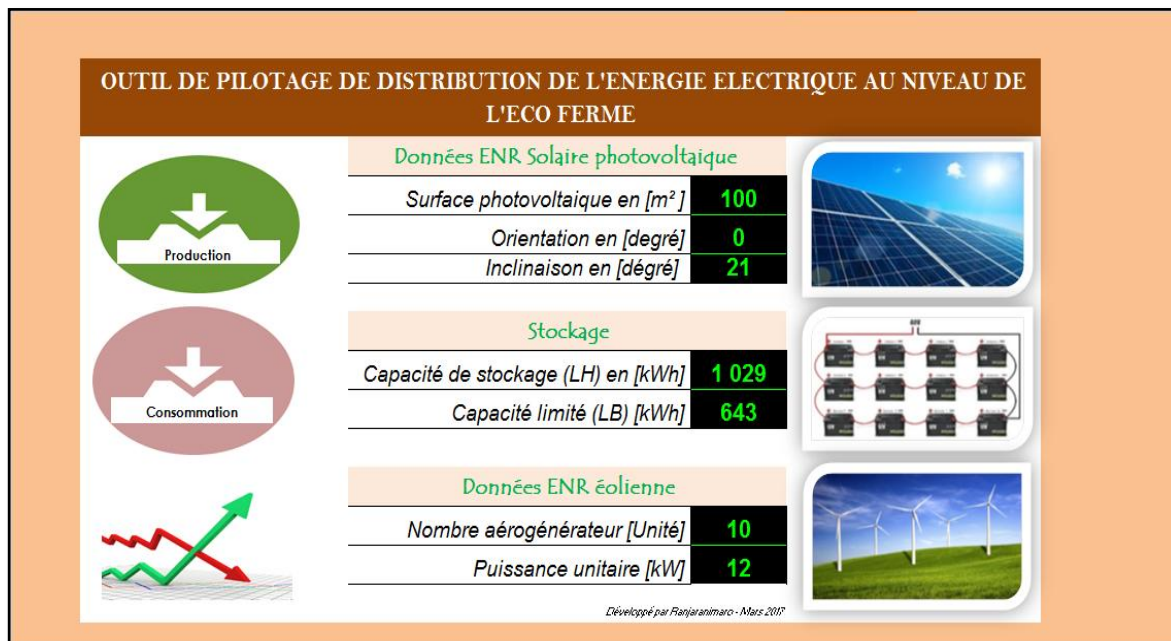


Figure 3.33 : Page d'accueil Outil de pilotage site "Eco Ferme"

3.4.2 - Simulation de la distribution horaire d'électricité

3.4.2.1 - Dimensionnement des systèmes de production

Pour rappel, le système de production électrique à partir des EnR sera dimensionné à partir de trois journées types d'ensoleillement : favorable, défavorable et moyen. Sur le Tableau 3.31, nous récapitulons sur l'ensemble des trois journées types les valeurs d'ensoleillement.

Tableau 3.31 : Récapitulatif des données par type de journée sur le site de l'Eco Ferme

Type de journée	Jour correspondant	Valeur relevée
Favorable	24 Octobre	467,32 W/m ²
Défavorable	17 Juillet	53,49 W/m ²
Moyenne	02 Août	285,36 W/m ²

En nous basant sur notre outil de simulation, nous avons effectué les simulations afin de trouver les résultats de production électrique à partir d'EnR adaptés, c'est-à-dire lorsque nous avons la courbe moyenne de production journalière qui est juxtaposée par le bas avec la courbe moyenne de consommation journalière. Ces résultats de production EnR selon le type de journée en fonction de la surface des PV et des dix éoliennes sont donnés sur les figures suivantes.

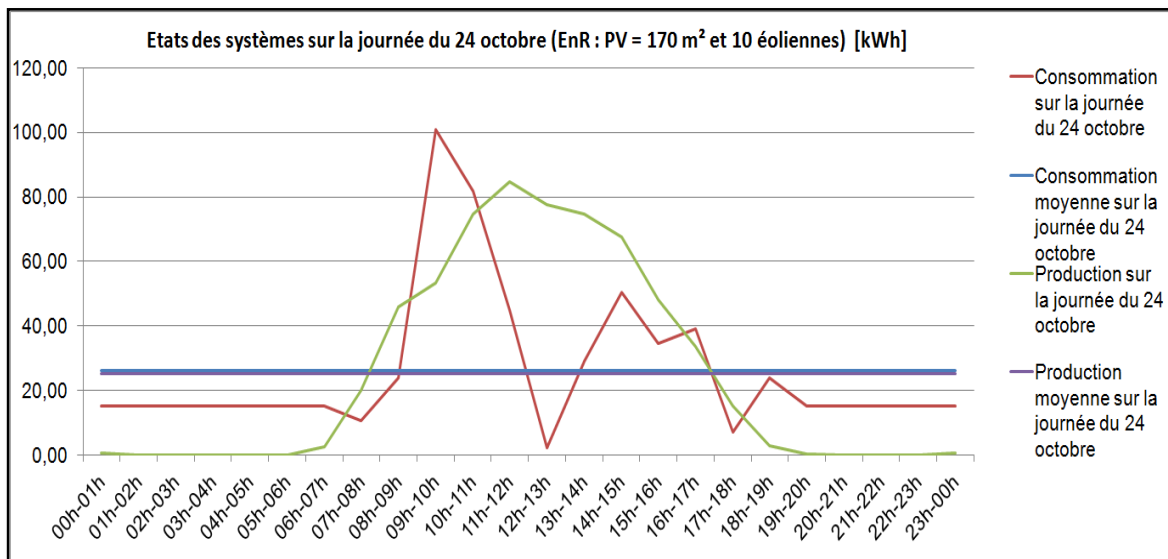


Figure 3.34 : États des systèmes sur la journée type favorable du 24 octobre

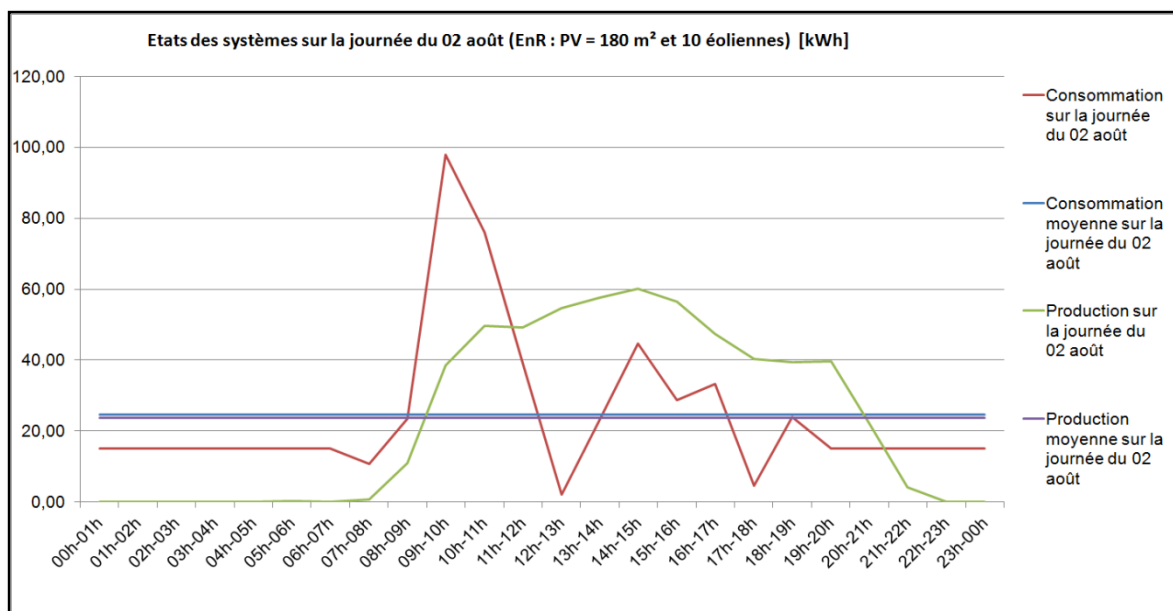


Figure 3.35 : États des systèmes sur la journée type moyenne du 02 août

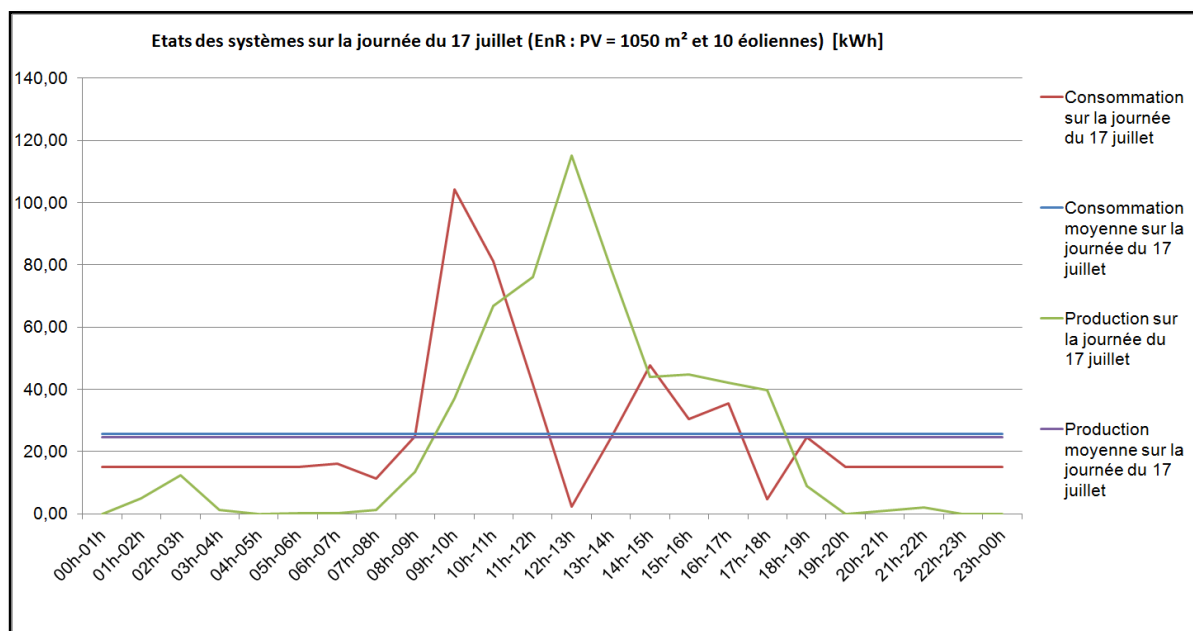


Figure 3.36 : États des systèmes sur la journée type moyenne du 17 juillet

D'après ces simulations, nous remarquons que selon les saisons ou périodes, nous devrions adapter la surface des PV afin de pouvoir faire en sorte que la production moyenne journalière juxtapose la consommation moyenne journalière. Cependant, c'est difficilement réalisable cette situation dans la réalité. C'est pour cette raison que nous avons fait le choix pour les dimensionnements de prendre une journée où la consommation est la plus élevée, d'y caler la surface de production à partir du PV, pour ensuite pouvoir calculer les capacités de stockage. Nous avons trouvé que sur la journée du 10 janvier, nous avons la consommation électrique qui est à son plus niveau sur l'Eco Ferme. Avant de présenter nos résultats de simulation sur ce dernier point, nous allons d'abord faire une brève estimation des coûts d'achats des systèmes de production EnR à partir du PV et d'éolienne sur la base des données sur les journées dites "favorable", "défavorable" et "intermédiaire".

Approximation du coût d'une éolienne[81]

Exemple de coût pour une éolienne de 12 kW de 16 mètres de haut :

- Kit éolien (mât, visseries, régulateur de charge, onduleur, batteries) : 25 000 à 30 000€;
- Installation : 15 000 à 20 000 €;
- Coût total : de 35 000 à 50 000 €.

Aide possibles :

- Prise en charge par le conseil général : 50% de la somme;
- Prise en charge en crédit ou remboursement par l'état : 50% des 50% restant.

Avec le maximum d'aides dont il est possible de bénéficier, un consommateur peut réaliser des économies de 75% ainsi la charge réelle sera de 25% du prix total, soit environ 9000€ pour une éolienne de 12 kW.

Approximation du coût de PV :

La puissance crête installée de notre PV sur l'Eco Ferme est de :

- 23,5 kWc pour le type de journée favorable;

- 24,8 kWc pour le type de journée intermédiaire;
- 114,9 kWc pour le type de journée défavorable.

Nous supposons que le prix du m² pour un module polycristallin est d'environ de 800€. Sur l'Eco Ferme, nous avons :

- 170 m² de surface installée en journée favorable;
- 180 m² de surface installée en journée intermédiaire;
- 1050 m² de surface installée en journée défavorable.

Le coût total associé à ces surfaces sont d'environ :

- 136 000 € pour une installation basée sur la journée d'irradiation favorable;
- 144 000 € pour une installation basée sur la journée d'irradiation intermédiaire;
- 840 000 € pour une installation basée sur la journée d'irradiation défavorable.

Ces prix semblent élevés mais il existe des aides de l'État et en général le prix des PV permet toujours un retour sur investissement compris aux alentours d'une dizaine d'année.

Maintenant, nous allons vous présenter les résultats des simulations afin d'optimiser la production électrique à partir d'EnR au niveau de l'Eco Ferme en nous basant sur une journée d'été austral qui est la journée du 10 janvier. C'est la journée où nous avons relevé la consommation électrique la plus élevée.

Nous avons effectué nos simulations en calant la surface de capteur PV à 100m² et l'installation sur place de façon permanente de 10 éoliennes de 12 kW chacune. Sur les figures suivantes, nous allons donner l'ensemble des résultats de nos simulations.

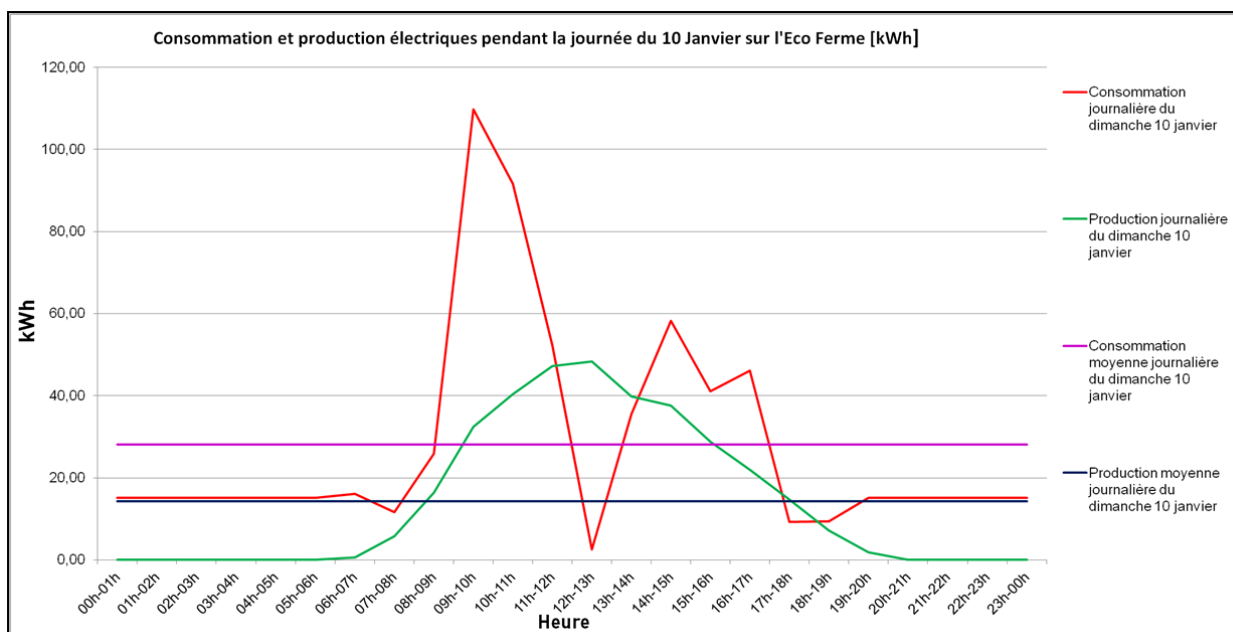


Figure 3.37 : Résultats des simulations sur la journée du 10 janvier [100 m² de capteur PV et 10 éoliennes]

Nous constatons sur cette Figure 3.37 que la courbe de la production électrique moyenne journalière (en bleu) est trop décalée par rapport à la courbe de la consommation électrique moyenne journalière (en rose). Afin de pouvoir rapprocher ces deux courbes pour qu'elles se juxtaposent, nous allons augmenter la surface de capteur PV. Les résultats sont donnés sur la Figure 3.38.

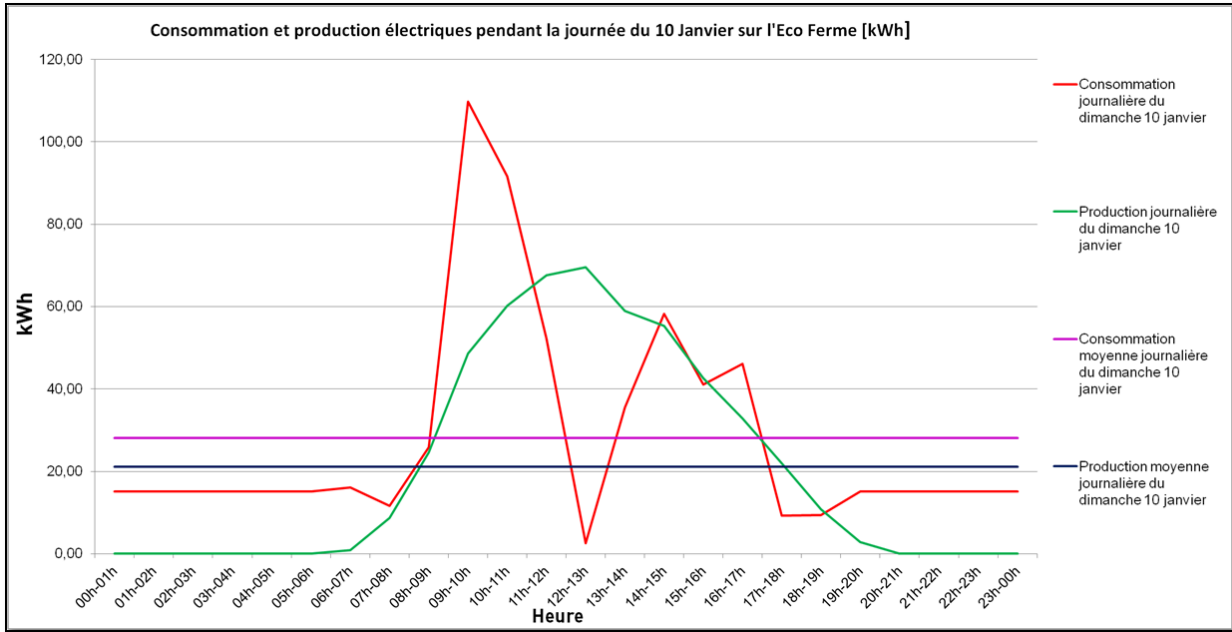


Figure 3.38 : Résultats des simulations sur la journée du 10 janvier [155 m² de capteur PV et 10 éoliennes]

Sur cette Figure 3.38 comme sur la Figure 3.37 les courbes de consommation et production journalières moyennes ne se juxtaposent pas, même elles se sont rapprochées un peu plus. Nous continuons donc les simulations.

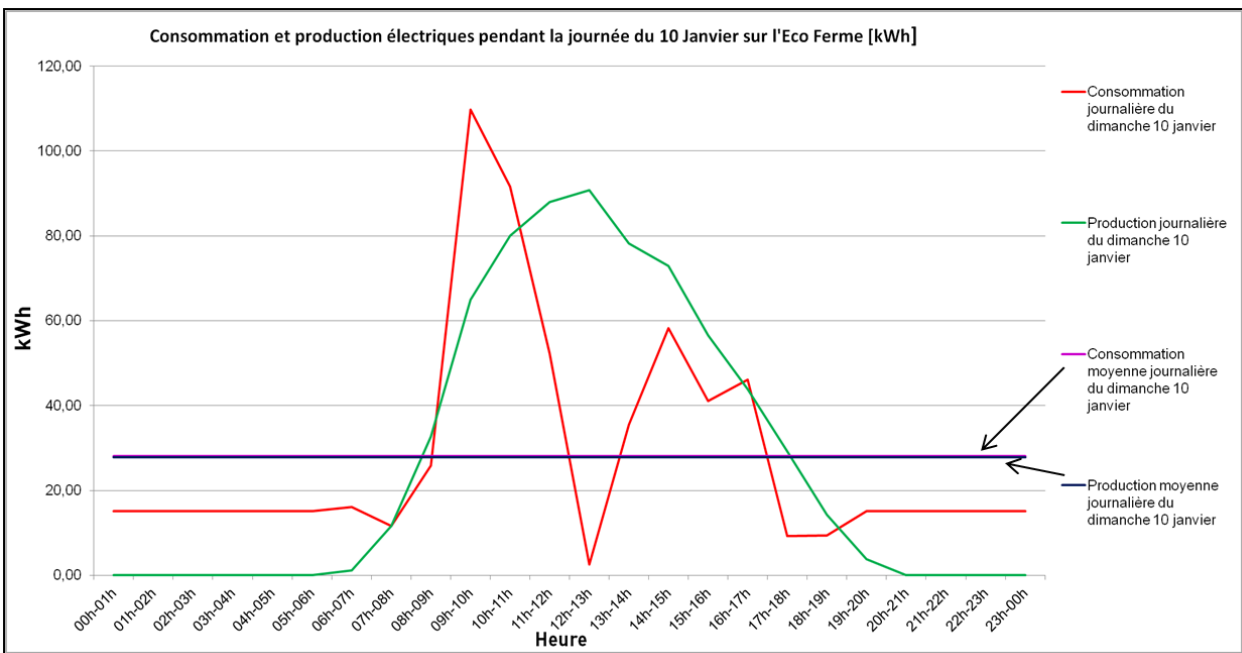


Figure 3.39 : Résultats des simulations sur la journée du 10 janvier [200 m² de capteur PV et 10 éoliennes]

Nous remarquons sur cette Figure 3.39 que les courbes de consommation et production moyennes journalières se juxtaposent. Nous avons ici trouvé les valeurs optimales des systèmes de production électrique à partir de capteurs PV et d'éoliennes. Pour les capteurs PV, il faut 200m² de capteurs et les 10 éoliennes de départs. Nous estimons que le taux de couverture est de 80% au niveau de l'Eco Ferme.

Nous avons voulu avoir une idée sur la manière dont les systèmes se comportent sur un mois intermédiaire (mars) et un mois d'hiver austral (juillet) avec les données optimisées. Les résultats sont donnés sur les deux figures suivantes.

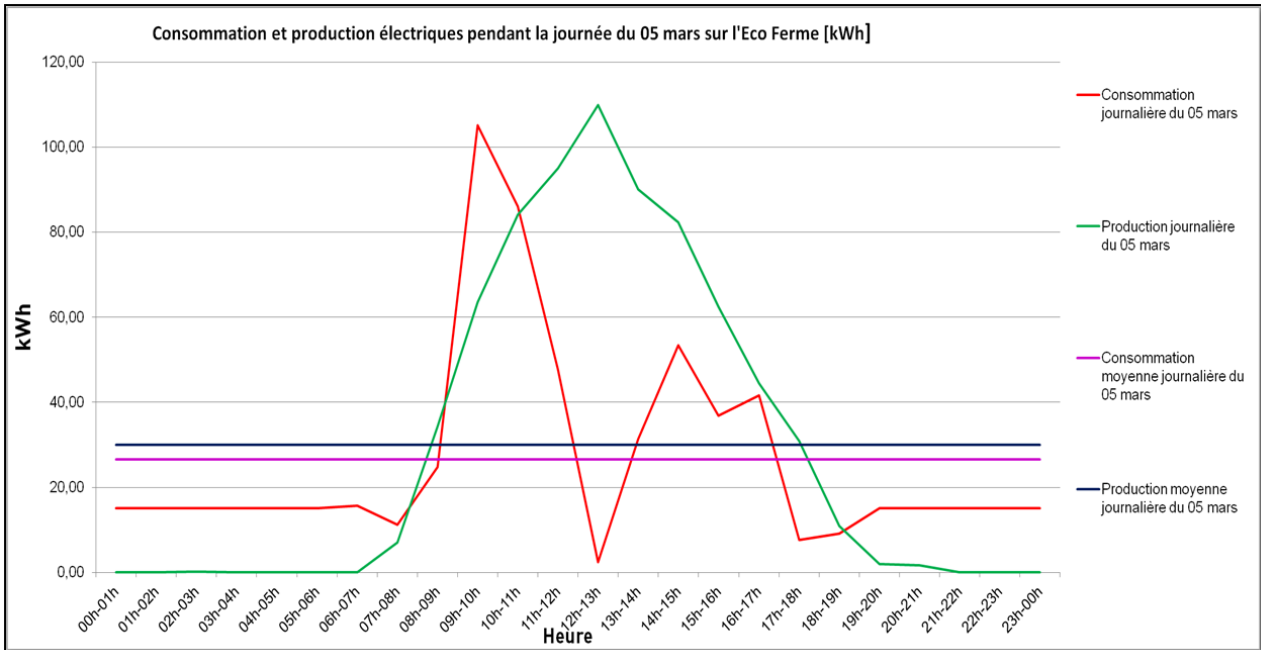


Figure 3.40 : Résultats simulation sur un mois intermédiaire avec les données optimales de la production [200 m² de capteur PV et 10 éoliennes]

Sur cette Figure 3.40, nous constatons que sur ce jour précis d'un mois intermédiaire que la production moyenne journalière est supérieure à la consommation moyenne journalière. Ceci a été possible car, il y a eu beaucoup d'ensoleillement en ce jour précis, ce qui a permis à la production moyenne journalière d'augmenter. Nous allons maintenant visualiser les résultats pour un mois d'hiver austral.

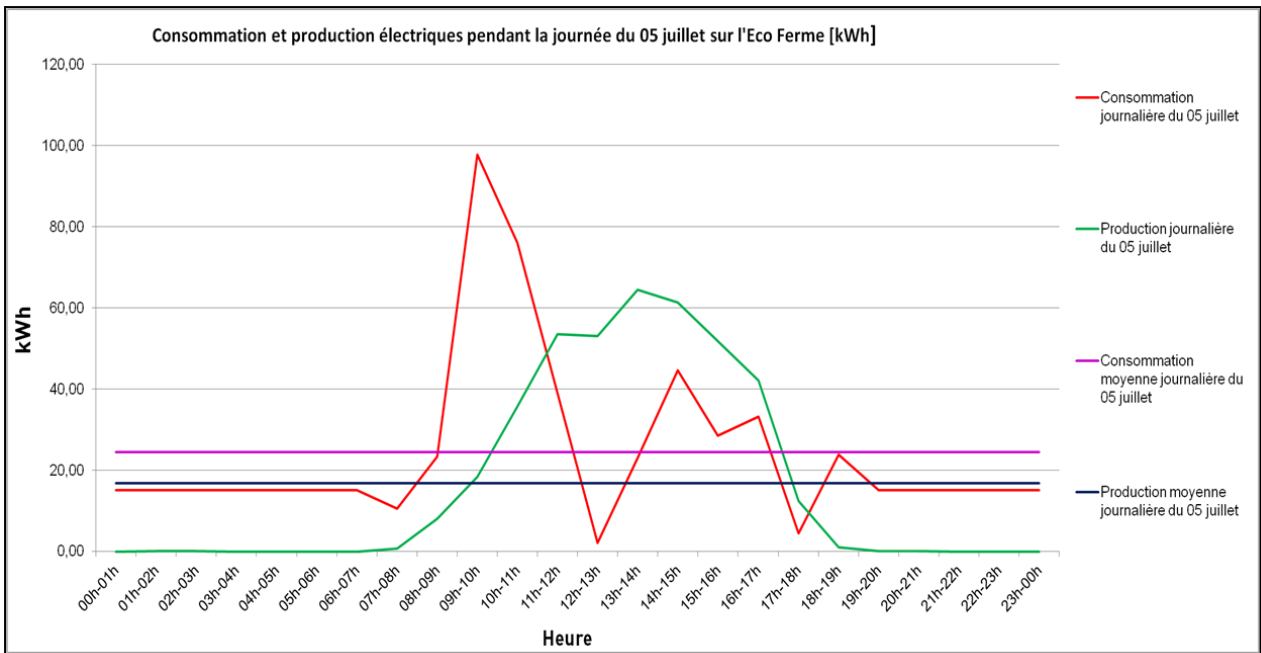


Figure 3.41 : Résultats simulation sur un mois d'hiver austral avec les données optimales de la production [200 m² de capteur PV et 10 éoliennes]

Sur cette Figure 3.41, nous remarquons que sur ce jour précis la courbe de production moyenne journalière est en dessous de la courbe de consommation moyenne journalière. Lorsque nous visualisons la courbe de production sur la journée, nous observons que sur ce jour, il y a eu très peu d'ensoleillement, ce qui explique ce phénomène. Néanmoins, l'écart se situe à moins de 10 kWh.

En analysant, les courbes moyennes de consommation et production électriques, nous observons qu'avec nos valeurs optimisées, nous arrivons à répondre à plus de la majorité de la demande électrique. Nous remarquons que selon l'ensoleillement, la production peut se situer soit au-dessus ou en-dessous de la consommation. Afin de pouvoir répondre, à la demande pour pouvoir lisser les pics de consommation électrique, il nous faut installer un système de stockage électrique qui peut stocker les excédents de production pour les restitués sur les périodes de manques de production en vue de lisser de pic de consommation électrique.

3.4.2.2 - Dimensionnement de la capacité de stockage

L'Eco Ferme utilise des capteurs dont la puissance crête unitaire est de 230 Wc[61] pour environ une centaine de m² d'installé. Lorsque, nous connaissons la surface totale des capteurs et la superficie d'un capteur, nous pouvons déduire le nombre de Wc installé sur un site donné. Pour l'Eco Ferme, nous avons une puissance photovoltaïque installée qui dépasse les 1600 Wc du coup, nous allons nécessairement prendre un système de stockage avec une tension de 48V. En général, il est conseillé une valeur de tension selon le cas de figure définis au niveau du Tableau 3.32.

Nous faisons le choix de prendre comme batterie de base, des batteries Gel 12V-200Ah au prix unitaire de 399€ TTC. En effet, ce type de batterie est résistant et ne nécessite pas d'entretien, en plus d'avoir une capacité de décharge profonde, ce qui lui permet d'avoir une durée de vie en cyclage élevée (de 600 à 1600). Elles sont très appréciées pour des cycles répétitifs, en utilisation quotidienne. Et comme nous souhaitons que lisser les pics au niveau de la courbe de charge de consommation, nous supposons que les charges excessives seront réduites au minimum, et nous trouvons qu'elles sont les mieux adaptées.

Pour obtenir, 48V en tension avec une batterie Gel 12V-200Ah, nous allons brancher quatre batteries en série (4*12 = 48), ce qui nous donnera un lot de batterie Gel 48V-200Ah. Si nous souhaitons augmenter l'ampérage heure, il faudra cette fois-ci faire un montage en parallèle avec le même lot de batterie.

Tableau 3.32 : Tension de batterie recommandée selon la puissance PV installée

Puissance de l'installation photovoltaïque	Tension recommandée
De 0 à 800 Wc	12 V
De 800 à 1600 Wc	24 V
Au dessus de 1600 Wc	48 V

Source : Novea énergies

La consommation électrique annuelle au niveau de l'Eco Ferme est de 234 379 kWh, ce qui correspond à 642 135 Wh par jour (234 379 000 / 365 = 642 135 arrondie au chiffre rond supérieur).

La relation qui lie l'énergie et la puissance est la suivante : $P [W] = \frac{E [Wh]}{t [s]}$ (1)

Celle qui lie la puissance électrique à la tension et l'intensité est la suivante : $P [W] = U[V] * I [A]$ (2)

A.N :

$$P [W] = \frac{642\,135}{86400} = 7,44 [W]$$

$$I [A] = \frac{7,44}{48} = 0,155 A$$

Si nous optons pour une autonomie complète sur une journée, il s'avère après calcul que le lot de batterie type Gel 48V-200Ah peut assurer le stockage (1 jour = 24H; $0,155 / 24 = 0,00646$ Ah ; $0,00646 / 200 = 0,0000323 = 1$). Dans notre cas d'étude, nous ne souhaitons que lisser les pics de consommation électrique lié à l'Eco Ferme. Nous faisons le choix de prendre comme batterie de base, des batteries Gel. Nous allons prendre un lot composé de quatre batteries montées en série pour avoir un lot de batterie Gel 48V-200Ah. Pour information, la consommation électrique maximum (énergie) estimée au niveau de l'Eco Ferme est de 186,44 kWh enregistrée le 28 février.

En utilisant les relations (1) et (2), nous avons :

A.N :

$$P = 186\,440 / 3600 = 51,78 = 52 [W]$$

$$I = 52 / 48 = 1,08 = 2 [A]$$

Au vue de ces calculs, nous pouvons affirmer qu'un système de stockage de batterie Gel 48V-200Ah sera largement suffisant pour répondre à notre problématique de lissage de pic de la courbe d'appel réseau.

À présent, nous allons vous présenter les résultats de simulation pour le système de stockage. Nous rappelons, qu'il nous faudrait au total 26 792 Ah soit environ 1351 kWh de capacité de stockage afin de pouvoir répondre à la totalité de la consommation journalière. Cependant, nous nous souhaitons juste lisser les pics de charge et non pas répondre à la totalité de la consommation électrique. Pour optimiser le système de stockage, nous allons effectuer des simulations jusqu'à ce que la courbe de l'excédent devienne nulle. Nous avons commencé notre simulation avec une capacité de stockage de 250 kWh, les résultats sont donnés sur la Figure 3.42.

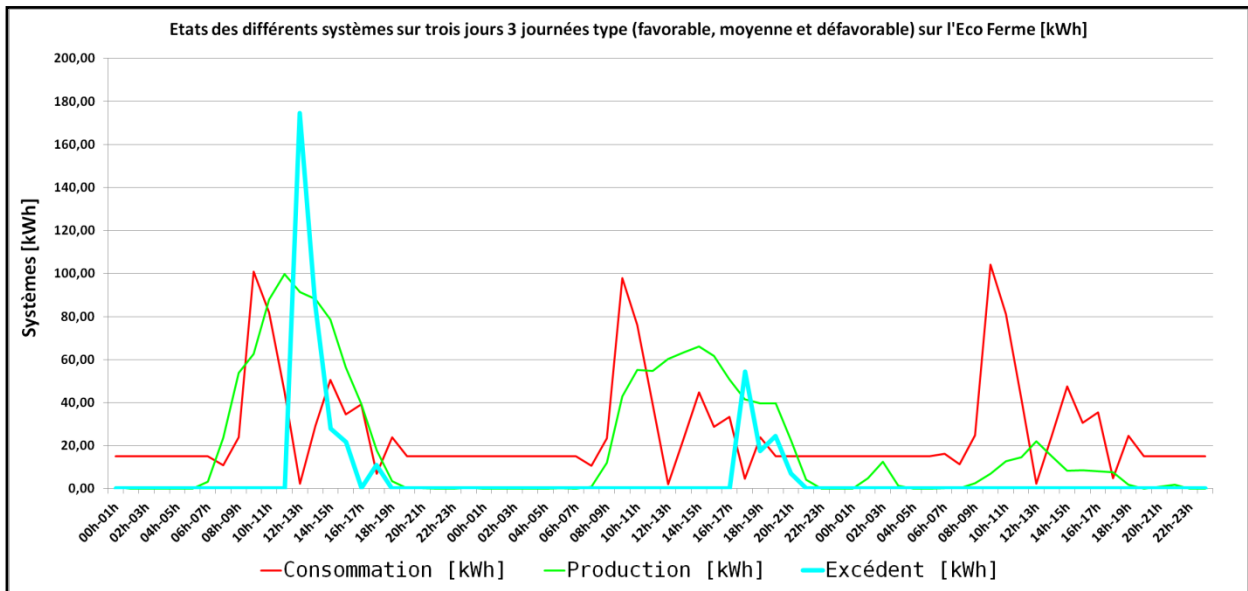


Figure 3.42 : États des différents systèmes sur 3 journées-types (favorable, intermédiaire et défavorable) sur l'Eco Ferme avec une capacité de stockage de 250 kWh [kWh]

Sur cette Figure 3.42, nous remarquons qu'avec une capacité de stockage de 250 kWh, nous avons énormément d'excédent. Nous allons donc augmenter cette capacité de stockage à 290 kWh afin de diminuer l'excédent, les résultats sont donnés sur la Figure 3.43.

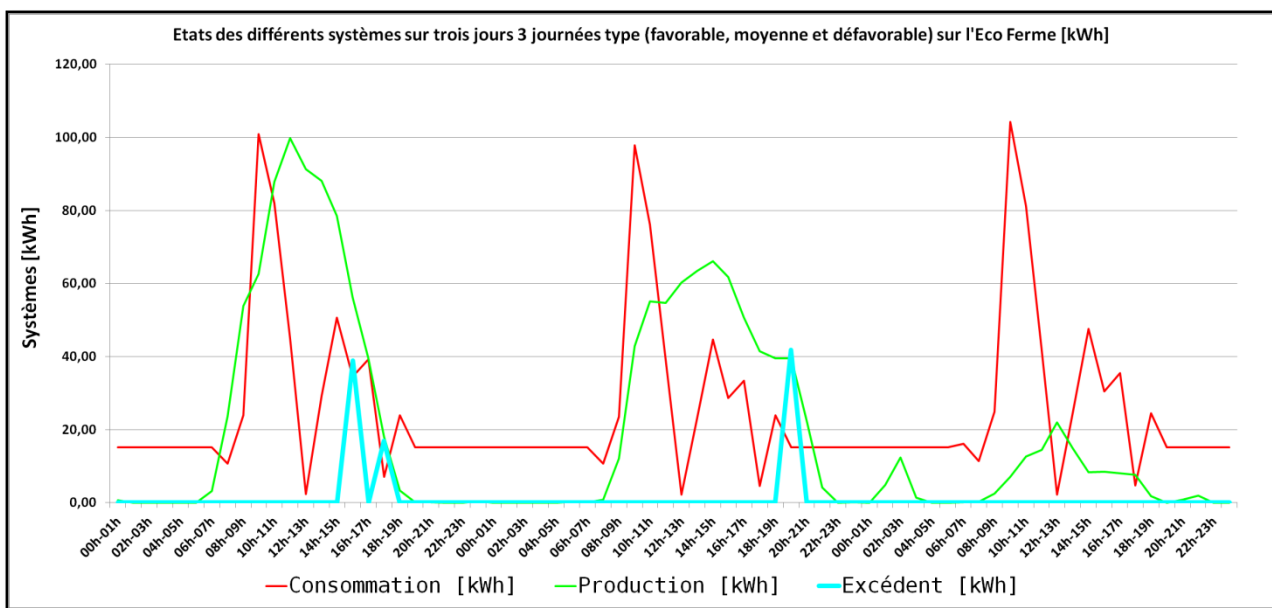


Figure 3.43 : États des différents systèmes sur 3 journées-types (favorable, intermédiaire et défavorable) sur l'Eco Ferme avec une capacité de stockage de 290 kWh [kWh]

Sur cette Figure 3.43, nous observons qu'avec une capacité de stockage de 290 kWh, nous diminuons de manière significative l'excédent. Étant donné, que l'excédent n'est pas encore nul, nous continuons les simulations, les résultats sont donnés sur la Figure 3.44.

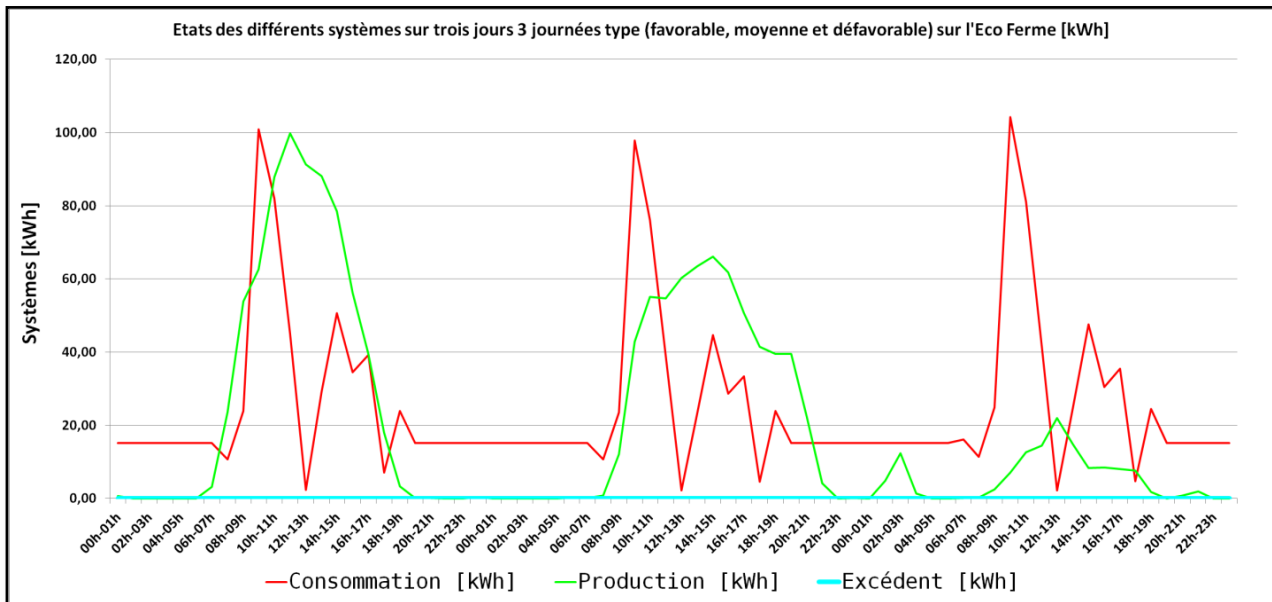


Figure 3.44 : États des différents systèmes sur 3 journées-types (favorable, intermédiaire et défavorable) sur l'Eco Ferme avec une capacité de stockage de 298 kWh [kWh]

Nous remarquons sur cette Figure 3.44, que la courbe de l'excédent est maintenant nulle, ce qui nous permet de conclure que nous avons trouvé notre optimisation pour le système de stockage qui est de 298 kWh. Par rapport à la valeur d'origine qui était de 1351 kWh, nous avons réalisé une baisse de 78% sur la capacité de stockage. Cette baisse de la capacité de stockage permet aussi de pouvoir réaliser des économies lors de l'achat des matériels afin de minimiser le gaspillage.

Nous allons maintenant donner les résultats de simulations au niveau de l'appel au réseau électrique. Nous devons effectuer des simulations jusqu'à ce que l'appel au réseau électrique ne dépasse plus la valeur limite que nous avons fixé, à savoir 10 kWh. Nous avons débuté notre simulation en fixant la limite haute de stockage à 100 kWh, la limite basse du stockage à 10 kWh et la limite de l'appel réseau à 10 kWh. Sur ces simulations, nous allons faire varier que la valeur de la limite haute. Les résultats de simulation sont donnés sur la Figure 3.45.

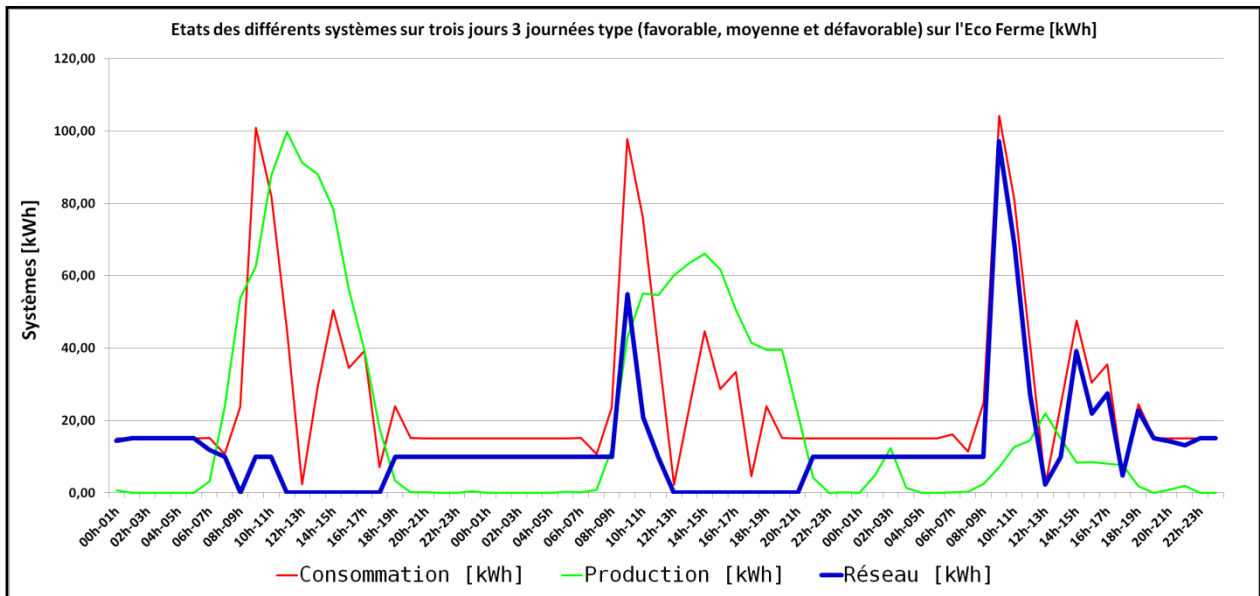


Figure 3.45 : États des différents systèmes sur 3 journées-types (favorable, intermédiaire et défavorable) sur l'Eco Ferme [Limite haute = 100 kWh]

Nous remarquons sur cette Figure 3.45 que même si nous avons une partie de la courbe d'appel au réseau qui commence à être lissée à 10 kWh, il reste encore beaucoup de pic sur l'appel au réseau, il nous faut donc continuer les simulations jusqu'à ne plus dépasser 10 kWh sur l'appel au réseau. Nous avons donc appliqué une limite de 200 kWh sur la limite haute dont nous reproduisons les résultats sur la Figure 3.46.

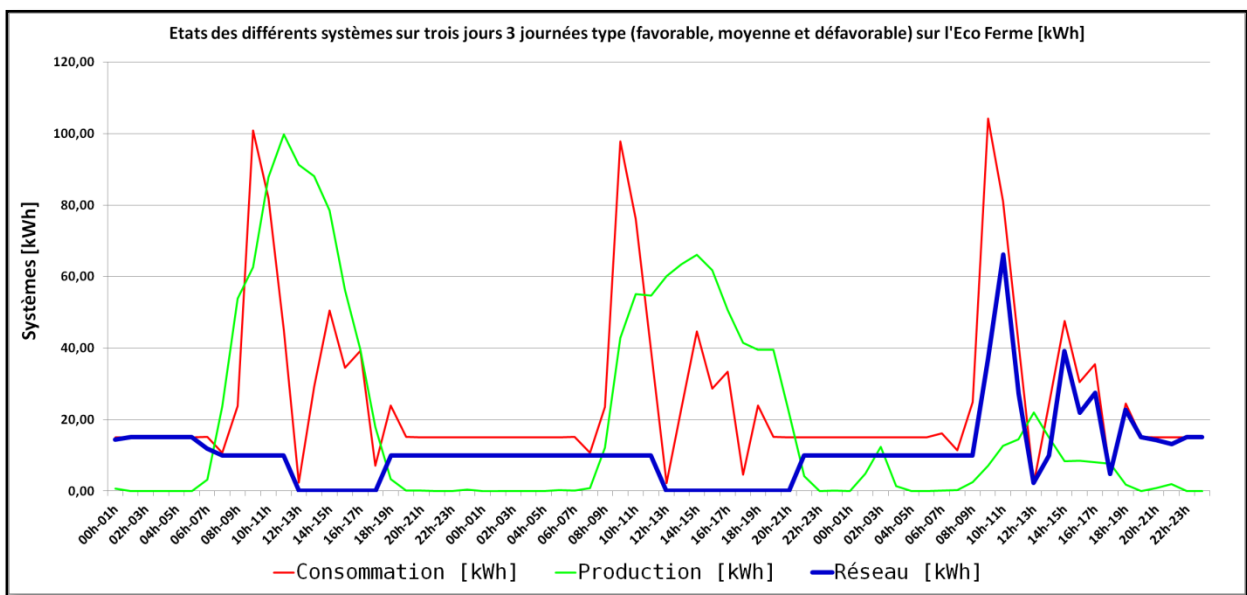


Figure 3.46 : États des différents systèmes sur 3 journées-types (favorable, intermédiaire et défavorable) sur l'Eco Ferme [Limite haute = 200 kWh]

Nous visualisons sur cette Figure 3.46 que la courbe de l'appel au réseau commence à prendre un aspect plus significatif de ce que nous souhaitons. Néanmoins, nous n'y sommes pas encore car nous constatons encore quelques pics non accentués sur la droite de la courbe. Nous continuons donc les simulations avec une valeur de 284 kWh pour la limite haute. Les résultats sont donnés sur la Figure 3.47.

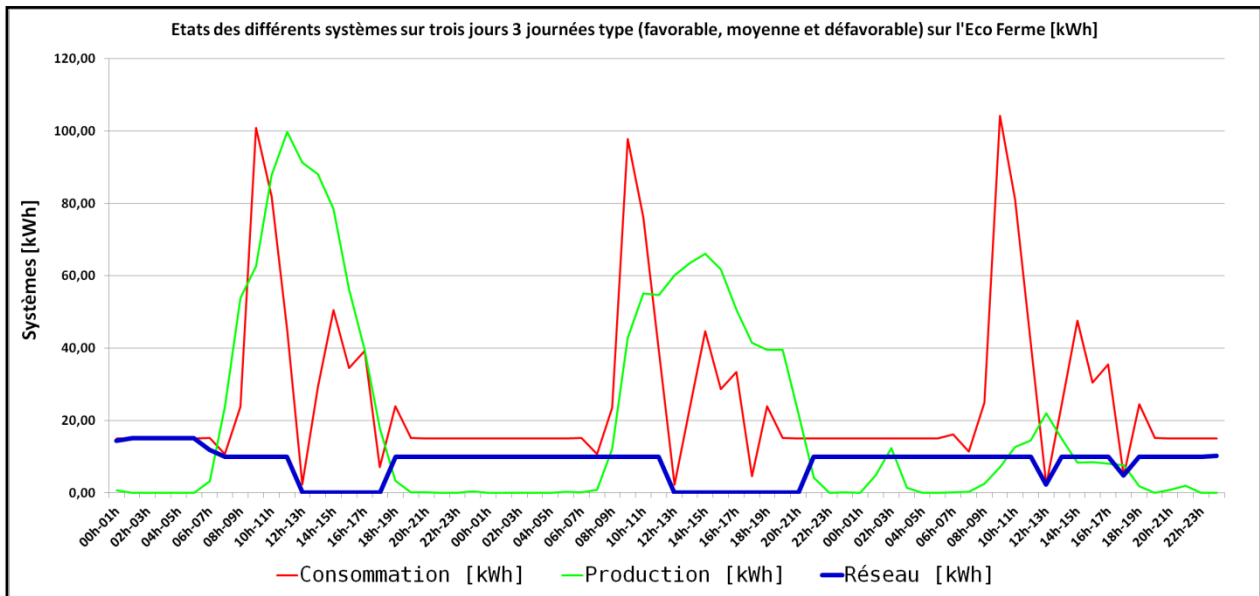


Figure 3.47 : États des différents systèmes sur 3 journées-types (favorable, intermédiaire et défavorable) sur l'Eco Ferme [Limite haute = 284 kWh]

Nous remarquons sur cette Figure 3.47 que la courbe d'appel au réseau répond à nos attentes, c'est-à-dire limité l'appel réseau au maximum à 10 kWh. Ce résultat est atteint pour une limite haute de 284 kWh.

Nous donnons ci-dessous, les différentes valeurs de nos différents systèmes optimisés afin de répondre à nos objectifs de simulation concernant l'Eco Ferme de Vincenzo :

- Limite haute : 284 kWh;
- Limite basse : 10 kWh;
- Limite Réseau : 15 kWh ($LR \leq 15$ kWh);
- Capacité de stockage : 298 kWh
- 200 m² de surface de capteur photovoltaïque;
- 10 éoliennes d'une puissance unitaire de 12 kW soit 120 kW l'ensemble.

3.4.2.3 - Explicitation du dispositif de stockage

L'Eco Ferme possède une consommation électrique estimée de 234 379,15 kWh dans l'année. Dans la section précédente, nous avons fait le choix d'opter pour des batteries avec une tension de base de 48 V afin de diminuer au maximum les déperditions. Le nombre de jour de réserve des batteries est fixé sur une journée. Nous proposons de régler la profondeur de décharge maximum des batteries à 50%. En utilisant la formule de la capacité de charge des batteries, nous pouvons déduire la capacité nominale du système de stockage.

Équation 4 : Capacité de charge des batteries

$$C [Ah] = \frac{D \left[\frac{Wh}{jour} \right] * N [jour]}{L [\%] * U [V]}$$

Avec :

- C : la capacité de charge du parc de batteries (système stockage).
- N : le nombre de jours avec un ensoleillement insuffisant. Par exemple, en France métropolitaine, pour une utilisation annuelle, 1 jour de réserve en batteries sont nécessaires.
- D : la demande électrique quotidienne exprimée en Wh/jour. Il s'agit de l'énergie nécessaire pour alimenter les systèmes électriques. Pour une maison, D peut, par exemple, s'obtenir en multipliant la puissance de chacun des appareils, par la durée d'utilisation quotidienne en heures.
- U : la tension en Volt sous laquelle est installé le parc de batteries.
- L : la profondeur de décharge maximum des batteries.

Pour le stockage, nous nous basons sur les besoins journaliers quotidiens afin de déterminer le nombre de batteries à installer. Les besoins quotidiens de l'Eco Ferme se situent environ à 643 kWh/jour. Ce chiffre a été trouvé en divisant la consommation annuelle du site (on a arrondi à un chiffre rond pour faciliter les calculs) par 365 ($234\,379,15/365 = 643$ kWh/jour). Nous avons fait le choix de prendre des batteries de type Gel 48V-200Ah. L'autonomie du site est fixée sur une journée. La quantité d'énergie qui sera consommée par le site est donc : $643 \text{ kWh} * 1 \text{ jours} = 643 \text{ kWh} = 643\,000 \text{ Wh}$.

En appliquant l'Équation 4 au niveau de l'Eco Ferme, nous obtenons :

$$C = \frac{643\,000}{0.5 * 48} = 26\,791,66 = 26\,792 \text{ Ah}$$

Au niveau de l'Eco Ferme, la capacité nominale du parc de batterie doit être de 26 792 Ah pour une autonomie sur une journée complète. Afin d'estimer les limites haute et basse de notre système de stockage, nous allons nous baser sur cette capacité de charge sans pour autant augmenter les Ah (c'est-à-dire le nombre de batterie) car nous rappelons que nous ne voulons pas assurer une autonomie complète, mais simplement lisser les pics de consommation. Et nous avons vu à la section 3.4.2.2 que nous pouvons réaliser notre lissage avec un seul lot de batterie Gel 48V-200Ah.

Afin d'obtenir le nombre de batterie pour pouvoir stocker la production maximum issue des EnR, il faut faire une fraction entre la capacité de charge trouvée et le nombre d'ampère-heure du système de stockage.

Pour information, nous allons tout de même donner le nombre de batterie qu'il aurait fallu acquérir afin de répondre à une autonomie complète basée une seule journée. Nous avons :

Équation 5 : Calcule nombre de batterie

$$\text{Nombre de batterie} = \frac{\text{Capacité de charge des batteries (stockage)}[\text{Ah}]}{\text{Capacité totale Ampère. heure du système de stockage} [\text{Ah}]}$$

Pour l'Eco Ferme, cela donne :

$$\frac{26\,792}{200} = 133,96 = 134 \text{ batteries}$$

Pour assurer de manière optimale le stockage pour une autonomie complète durant une journée, au niveau de l'Eco Ferme, il faudra au total 134 batteries.

En raison de 399 € l'unité, cela aurait représenté au total un coup de 53 466 € ttc pour le stockage.

Cependant, ce qui nous intéresse c'est le lissage des pics de la courbe de charge. Du coup, comme annoncé sur la section précédente, un seul lot de batterie Gel 48V-200Ah (c'est-à-dire 4 batterie Gel 12V-200Ah montées en série) est suffisant pour notre type d'étude.

3.5 - Synthèse du Chapitre III

L'outil développé permet de faire l'analyse entre la consommation totale du site et la production des systèmes EnR installés sur le site au pas de temps horaire. Sur l'outil, l'utilisateur doit renseigner les capacités de stockage, c'est-à-dire la capacité de stockage de la limite haute et la capacité de stockage de la limite basse ainsi que la surface des systèmes de production électrique d'origine EnR.

Nous remarquons qu'au niveau de l'Eco Ferme, notre outil nous permet de visualiser que le gain d'énergie peut-être très significatif selon le choix entre une couverture complète ou une couverture sur les pics de consommation. La couverture sur les pics de consommation permet de gagner environ plus de 75% de gain sur le système de stockage et environ 90% de gain au niveau de l'appel au réseau électrique local. Ces résultats démontrent qu'en ne se focalisant que sur le lissage des pics de consommation sur l'appel réseau, il est possible d'obtenir des gains très significatifs sur la facture d'électricité mais aussi sur l'achat des systèmes de production et de stockage.

4 - Chapitre 4 - Optimisation de la production d'électricité EnR dans le mix électrique d'un territoire : Application sur le département de Mayotte.



«Je crois à l'improbable, car si on en croit les projections, nous nous dirigeons vers le chaos économique, le chaos démographique, le chaos écologique, le chaos énergétique... Mais de l'improbable jaillit le big bang, origine d'émergence de la vie à toutes choses et source d'une Énergie Primordiale» Auteur

**«On opprime ceux qui cèdent, on respecte ceux qui résistent»
Proverbe Africain**

4. 1 - DONNÉES GÉNÉRALES SUR LA SITUATION ÉNERGÉTIQUE ET ÉCONOMIQUE DU DÉPARTEMENT DE MAYOTTE

4.1. 1 - Situation énergétique de Mayotte

4.1.1. 1 - Principales caractéristiques de l'île et sa situation énergétique

Dans cette section, nous présentons les données relatives à l'énergie existante sur Mayotte, pour cerner la situation énergétique et économiques de l'île.

Pour répondre aux objectifs que nous nous sommes fixés autour du pilotage de la distribution de l'énergie électrique, intégrant les ressources en EnR, il nous faudra reconstituer des fichiers horaires de consommations et de production énergétiques à différents échelles d'observations au niveau du territoire, puis au niveau de « micro territoires ». Il nous sera nécessaire d'analyser le contexte énergétique pour établir des simulations les plus cohérentes possibles.

4.1.1.1. 1 - Positionnement géographique

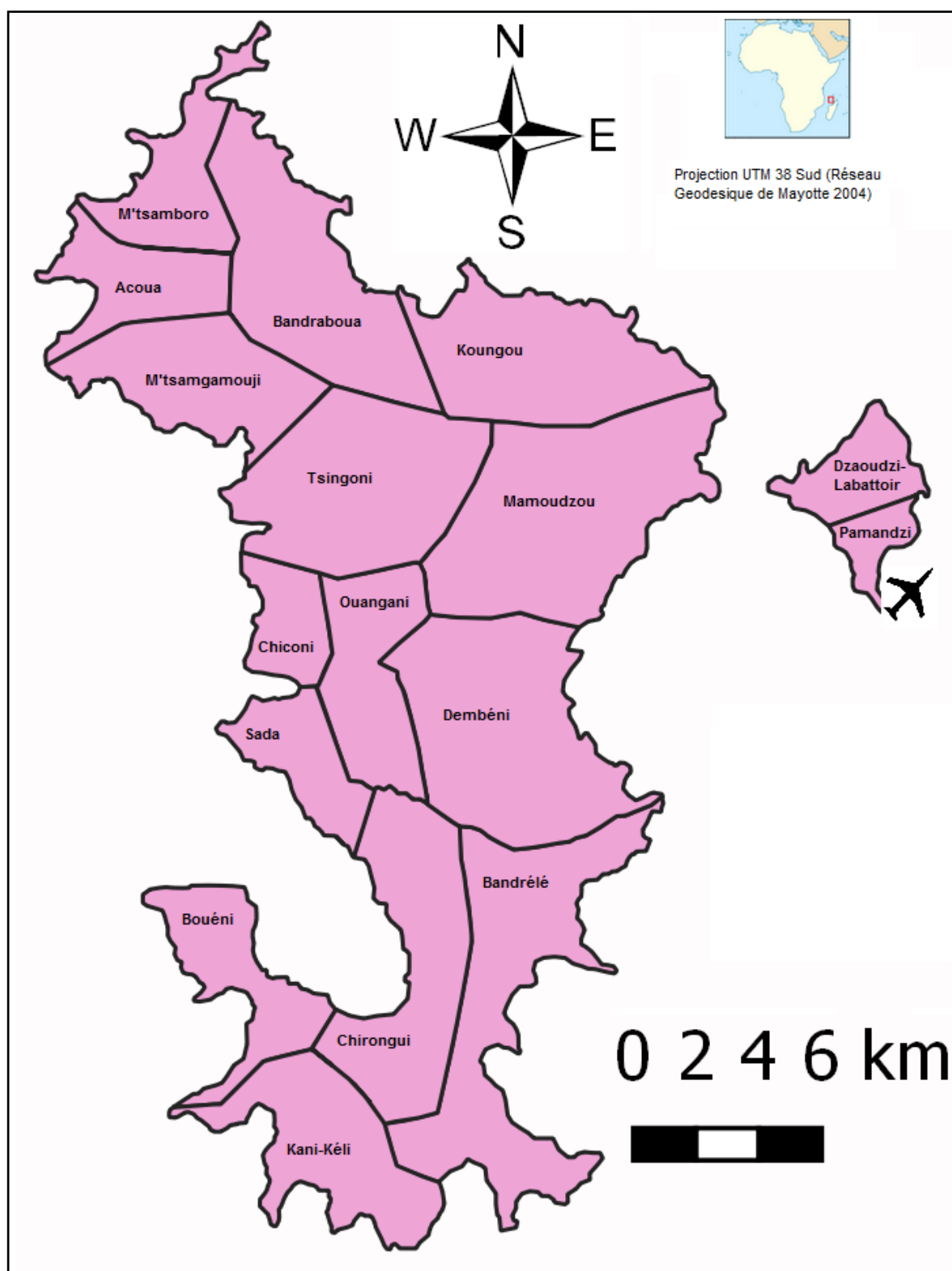


Figure 4.1 : Présentation de Mayotte
Auteur : El Assad

Mayotte se situe dans l'hémisphère sud, entre l'équateur et le tropique du Capricorne, au sud-ouest de l'Océan Indien par $12^{\circ}46'S$ et $45^{\circ}13'E$. Elle fait géographiquement partie de l'archipel des Comores.

Elle est entre la côte Sud-Est du continent Africain, à environ 500 km, et la côte Nord-Ouest de Madagascar à l'entrée nord du Canal du Mozambique, à environ 300 km. Elle se compose de deux îles principales d'habitation, la Grande-Terre (où vivent la majorité des habitants de l'île) et la Petite-Terre d'une superficie totale de 374 km², ainsi que d'une trentaine d'autres petites îles éparées autour de l'île.

D'après l'INSEE, entre 2007 et 2012, la population locale a connu une croissance annuelle moyenne de 2,7%, pour arriver en 2012 à 212 600 habitants sur l'île.

4.1.1.1. 2 - Contexte géologique

Mayotte est une île d'origine volcanique, mais relativement peu montagneuse. Elle possède quatre principaux sommets montagneux dont le plus haut ne fait que 660 mètres d'altitude. L'île n'est pas souvent soumise aux activités sismiques, néanmoins ces derniers mois, elle a connu des essaims de séisme à répétition plus ou moins soutenus selon l'échelle de Richter. Actuellement, elle ne bénéficie pas de matières premières fossiles exploitées localement.

4.1.1. 2 - Ressources énergétiques

L'île n'a, à ce jour, aucune ressource locale véritablement exploitée. L'essentiel des ressources exploitées est donc importée. L'énergie primaire est d'origine fossile, que ce soit au niveau de sa consommation globale comme au niveau de sa production électrique. En effet, en 2011, le taux de dépendance énergétique du territoire mahorais était de 98,6%. La production électrique, jusqu'en 2008, dépendait uniquement de ressources fossiles. À partir de 2008, la production électrique d'origine renouvelable commence à voir le jour sur l'île.

La Figure 4.2 ci-dessous renseigne pour chaque type d'énergie sa part au niveau des consommations primaires à Mayotte en 2011.

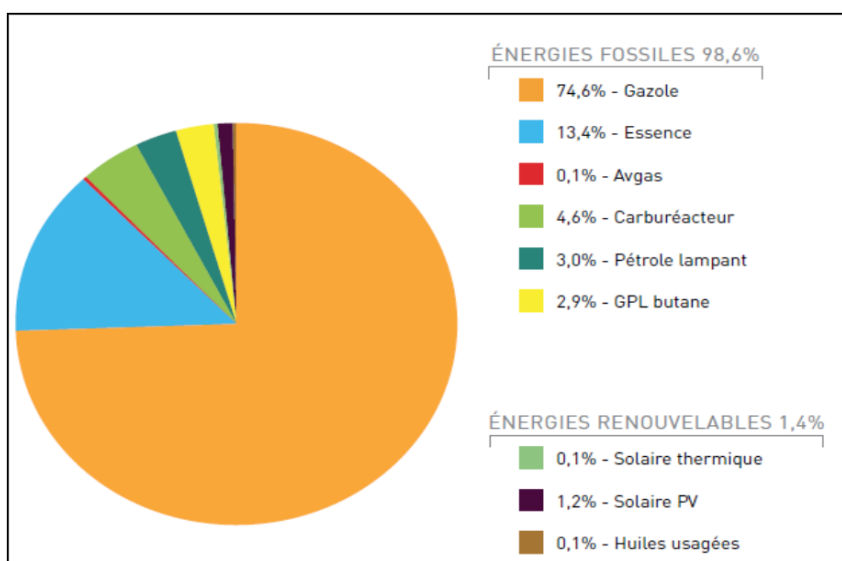


Figure 4.2 : Consommations primaires à Mayotte en 2011 en pourcentage du total
Source : OME[27]

D'après la Figure 4.2, le gazole est donc l'énergie la plus consommée à Mayotte (il représente 74,6% du total de la consommation d'énergie primaire sur le territoire). Viennent ensuite l'essence avec 13,4% des parts, puis les autres énergies fossiles qui représentent un total de 10,6% du total de la consommation d'énergie primaire d'origine fossile de l'île. Le gazole et l'essence représentent 88% de la consommation d'énergie primaire totale en 2011. Ces deux «carburants» constituent des sources essentielles pour le fonctionnement des moteurs thermiques.

À titre indicatif, à La Réunion en 2011, la consommation d'énergie primaire était dominée par le charbon avec 29,8% de part sur la consommation totale, ensuite le gazole avec 28,5%, puis le carburéacteur avec 14,2%, suivi de l'essence avec 7,7% et enfin les autres énergies qui apportent 19,8% de la consommation d'énergie primaire totale. À La Réunion, il existe deux centrales thermiques qui fonctionnent essentiellement avec du charbon et de la bagasse, ce qui explique la part élevée du charbon dans la consommation d'énergie primaire[82]. En France métropolitaine, en 2011, la consommation d'énergie primaire est dominée par l'électricité (nucléaire, hydraulique, éolien et photovoltaïque) avec 43,8% de part sur la consommation totale, ensuite le pétrole avec 31% de part, puis le gaz avec 15% de part et enfin les autres énergies qui fournissent 10,2% de la consommation d'énergie primaire totale[83].

Tableau 4.1 : Énergie totale consommée en 2011 (tep) dans les cinq DOM

	Énergie totale consommée en 2011 (tep)			Taux de dépendance énergétique
	Part fossile	Part EnR	totale	
Guadeloupe	786 000	62 000	848 000	92,7%
Guyane	267 412	44 506	311 918	85,7%
Martinique	700 480	40 500	740 980	94,5%
Mayotte	94 685	1280	95 965	98,6%
Réunion	1 254 000	166100	1 420 100	88,3%

Source : Bilan énergétique associé à chaque territoire

D'après le Tableau 4.1, le département de Mayotte enregistre le plus important taux de dépendance énergétique parmi les cinq DOM français, néanmoins, elle enregistre la plus petite des consommations d'énergie primaire. La première place en termes de consommation d'énergie primaire est tenue par le département de La Réunion.

4.1.1. 3 - Les différents postes de consommation énergétiques

Sur le département de Mayotte, l'énergie importée est consommée de façon disparate selon le secteur d'activité. D'après le BEM de 2011[27], la consommation énergétique a atteint un total de 63 381 tep (tonne équivalente pétrole). Sur ces 63 381 tep d'énergies consommées, 20 627 tep ont été utilisées pour la production électrique, 36 968 tep pour le secteur du transport et 5 787 pour le secteur chaleur et combustible.

Ci-dessous la Figure 4.3 montre la part de la consommation d'énergie finale par secteur.

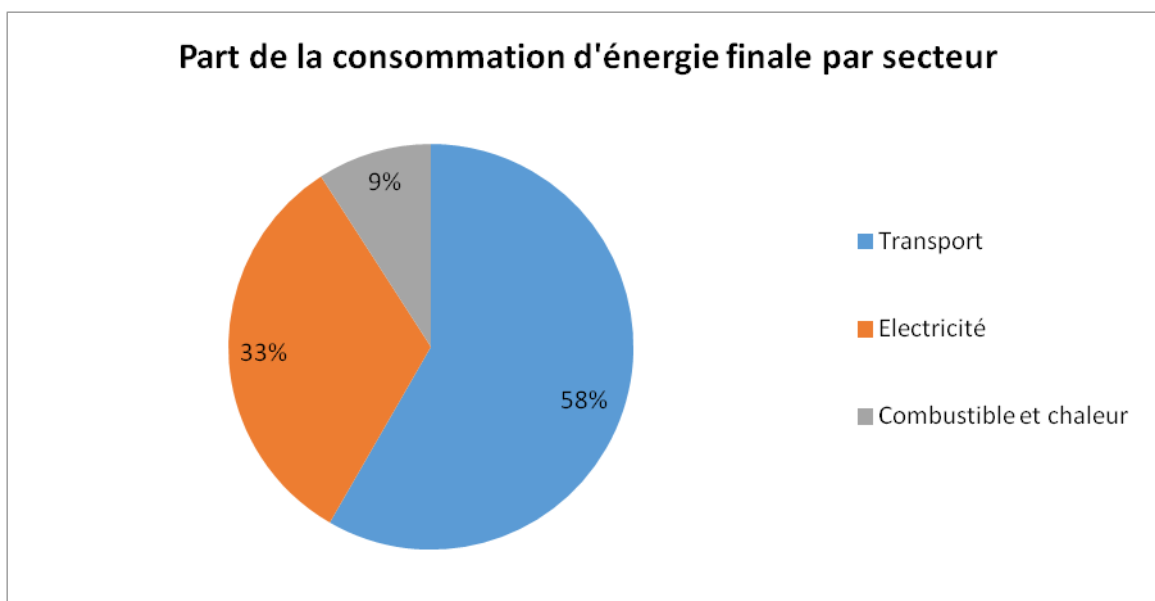


Figure 4.3 : Consommation d'énergie finale par secteur en 2011
 Source : OME, Auteur : El Assad Nidhoimi

Sur cette Figure 4.3, les secteurs du transport et de l'électricité concentrent plus de 90% de l'énergie finale consommée sur l'île. Ce phénomène montre que les déplacements prennent de plus en plus de place dans la société. Il existe 9% de l'énergie finale primaire qui est utilisée en tant que combustible ou chaleur en majorité pour l'industrie. Le secteur industriel est donc peu développé sur l'île. Concernant le secteur électrique, nous verrons de quelle manière se structure sa production ainsi que sa consommation sur l'île sur les sections suivantes. Le Tableau 4.2 fait un récapitulatif de la consommation énergétique par secteur en 2011 pour l'ensemble des cinq DOM français et de la France Continental.

Tableau 4.2 : Consommation énergétique en France continental et dans les DOM par secteur en 2011 [tep]

Territoire	Population 2011(en milliers)		Consommation énergétique finale par secteur en 2011 [tep]							
			Transport		Électricité		Combustible et/ou chaleur		Total	
France continental	63 070 344	96,82%	50 000 000	96,90%	37 100 000	98,44%	81 000 000	99,73%	168 100 000	98,59%
Guadeloupe	403 578	0,62%	394 855	0,77%	148 436	0,39%	30 077	0,04%	573 371	0,34%
Guyane	234 127	0,36%	147 033	0,28%	68 100	0,18%	38 779	0,05%	253 912	0,15%
Martinique	392 423	0,60%	398 080	0,77%	135 534	0,36%	22 822	0,03%	556 436	0,33%
Mayotte	209 038	0,32%	36 968	0,07%	20 627	0,05%	5 787	0,01%	63 382	0,04%
Réunion	829 402	1,27%	621 500	1,20%	214 900	0,57%	121 100	0,15%	957 500	0,56%
Total	65 138 912	100%	51 598 436	100%	37 687 597	100%	81 218 565	100%	170 504 601	100%

(1) Estimée

Source : INSEE et bilan énergétique du territoire associé

D'après ce Tableau 4.2, en 2011, Mayotte présentait les consommations d'énergie finale par secteur les plus faibles tous secteurs confondus parmi les cinq DOM français. Ce qui nous permet d'émettre l'hypothèse que le développement de Mayotte va continuer à croître de pair avec sa consommation énergétique[84]. En effet, dans le département de Mayotte, la marge de développement est encore énorme afin de pouvoir rattraper son retard structurel comparé aux autres DOM[85]. À l'inverse, c'est

le département de La Réunion qui enregistre la consommation totale d'énergie finale par secteur la plus élevée tous secteurs confondus. Ceci démontre qu'en termes de développement, l'île de La Réunion est plus développée que les autres départements français d'outre-mer, tandis que Mayotte est classée dernière, mais avec un potentiel avéré[85]. Plus un territoire se développe, notamment son domaine industriel, et plus ce territoire consommera de l'énergie[86]. Concernant le cas de Mayotte, le potentiel de développement est important car l'île possède peu de structure pour répondre aux aspirations de sa population qui est en augmentation constante.

4.1.1.3. 1 - La consommation et la production électrique sur l'île

L'évolution de la demande électrique sur le territoire mahorais a connu trois grandes périodes selon le document de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de Mayotte 2016-2018/2019-2023[87]:

- Une première période de très forte croissance entre 1995 et 2001, avec des taux de croissance de la demande allant jusqu'à 22,7% et un taux de croissance moyen sur la période de 19%;
- Une seconde période entre 2002 et 2009 sur laquelle les taux de croissance ont décliné, mais sont restés à deux chiffres. Le taux de croissance moyen sur la période est de 11%;
- Une troisième période depuis 2010 avec des taux de croissance qui sont passés sous la barre des 10% avec un taux de croissance moyen sur la période qui est de 4,6% (avec des situations très contrastées entre 2010-2013 à 6,5% environ et les années de crise de 2011-2012 à 2,6% et une année 2013 à 5,2%).

En 2011, la consommation électrique sur le territoire mahorais était de 20 627 tep, soit $2,39 \cdot 10^8$ kWh ou 239 000 MWh répartis de la manière suivante :

- 10 282 tep pour les particuliers, soit 119 000 MWh, ce qui représente 49,8% de la consommation totale électrique;
- 7 779 tep pour les professionnels, soit 90 470 MWh, ce qui fait 37,7% par rapport à la consommation totale;
- 2 252 tep pour les collectivités locales, soit 26 100 MWh, ce qui équivaut à 10,9% de la consommation totale;
- 314 tep pour l'éclairage public, soit 3650 MWh, ce qui correspond à 1,5% de la consommation totale.

Nous remarquons que les clients particuliers consomment près de la moitié de la production électrique de l'île en 2011. Vu que la population sur l'île croît chaque année, il est urgent d'anticiper la demande électrique qui ne fera que s'amplifier encore plus dans les prochaines années.

Pour répondre à cette consommation électrique, l'île dispose de deux centrales thermiques en Petite-Terre et en Grande-Terre de puissance dont les puissances installées respectives sont de 38,1 MW et 40 MW pour l'année 2011. En plus de ces deux centrales thermiques, elle produit aussi depuis 2008 de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques dont la puissance installée est de 11,9 MWc.

4.1.1.3. 2 - Le mix électrique de Mayotte

Le mix électrique de Mayotte se compose de gazole et d'huiles usagées pour la production électrique d'origine fossile et de panneaux photovoltaïques (PV) pour celle d'origine renouvelable. Le Tableau 4.3 ci-dessous donne les détails de la quantité de produits utilisée pour chaque type d'entrants au niveau de la production électrique, ainsi que de la quantité d'électricité produite obtenue à la sortie de 2002 à 2014 en s'aidant des documents du bilan énergétique (2011) et du PPE.

Tableau 4.3 : Production d'électricité à Mayotte de 2002 à 2014

	2002	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Entrants gazole [tep]	25 596	36 365	41 353	47 625	50 450	53 307	51 922	54 932	57 664	60 767
Entrants huiles usagées [tep]	0	97	190	255	0	105	97			
Entrants solaires [tep]	0	0	0	20	110	524	1 191	1 328	1 441	1 428
Production électrique [MWh]	115 057	171 038	196 225	217 793	238 682	257 537	261 915	270 992	285 014	299 297

Source : BEM et PPE

D'après le BEM, en 2002, le gazole était la seule source utilisée pour la production électrique. En 2011, cette production électrique est partagée par deux autres entrants qui sont les huiles usagées et le solaire photovoltaïque. Néanmoins, le gazole garde encore une part importante dans le mix électrique mahorais même si nous notons que cette production a légèrement diminué entre 2010 et 2011. Cette diminution peut-être expliquée par le fait qu'en 2011, il y a eu un important mouvement social qui a secoué l'île durant presque six mois. Cela s'est donc manifestement répercuté au niveau de la consommation électrique et donc de sa production. Quant au solaire photovoltaïque, il a connu des débuts hésitants, pour finalement afficher une augmentation remarquable en 3 ans, passant de 20 tep (0,23 GWh) de production en 2008 à 1 191 tep (13,85 GWh) en 2011, soit une production multipliée par 60 environ en trois années. Concernant la production électrique provenant des huiles usagées, on remarque que la production est très limitée en plus d'être sporadique.

En 2011, la part de la puissance photovoltaïque installée sur le réseau électrique mahorais était de 13,2% de la puissance totale installée (78,1 MW de puissance totale installée comme production de base, voir §4.1.1.5). Étant donné que l'installation de PV se faisait à un rythme exponentiel durant cette période, la limitation de 30% de pénétration d'EnR sur le réseau électrique mahorais n'était qu'une question de temps avant de pouvoir l'atteindre. C'est pour cela qu'en 2012 une extension de la centrale de Longoni a été décidée afin de renforcer le réseau pour pouvoir accueillir plus de production EnR et de pouvoir répondre aux besoins de la population. La centrale de Longoni est passée de 40 MW à 74 MW de puissance installée entre 2012 et 2015. En termes de production électrique de base, en 2014, la puissance installée se compose des installations suivantes :

- Centrale thermique des Badamiers (Petite-Terre) d'une puissance installée de 38 MW.
- Centrale thermique de Longoni d'une puissance installée de 74 MW.

Soit un total de 112 MW de puissance de base installée. Pour information, il y a eu pendant quelques années une centrale de production thermique qui avait été mise en place sur Kawéni dont la puissance

installée était de 11 MW. Mais cette centrale ne fonctionne plus actuellement depuis l'extension de celle de Longoni.

La production électrique d'origine renouvelable en 2014, que nous qualifierons d'appoint pour le moment, se compose de 72 centrales photovoltaïques d'une puissance installée de 9,24 MW réparties sur l'ensemble du territoire.

Au total, fin 2014, la puissance totale installée du territoire mahorais pour la production électrique se situe à 121,24 MW dont 92% sont d'origine fossile et 8% d'origine renouvelable.

En tenant compte des données du Tableau 4.3, nous avons réalisé le graphique ci-dessous.

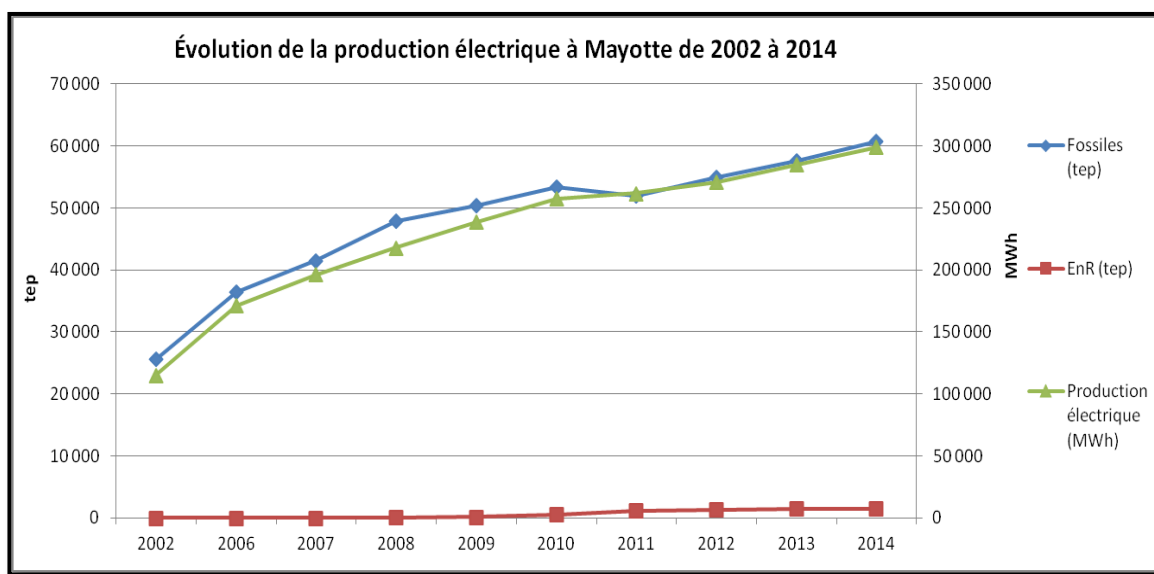


Figure 4.4 : Évolution de la production électrique à Mayotte de 2002 à 2014

Nous remarquons que la tendance de la production électrique totale sur le territoire de Mayotte est la même que celui de la production électrique d'origine fossile de 2002 à 2014. Ce qui démontre bien que la production électrique d'origine renouvelable est encore très marginale par rapport à la production totale. En 2014, sur une production électrique totale de 299 297 MWh, nous avons 282 686 MWh d'origine fossile et 16 611 MWh d'origine EnR, ce qui ne représente que 5,6% de part d'EnR sur le mix électrique. Le Tableau 4.4 ci-dessous donne l'évolution et les principales caractéristiques du PV connecté au réseau (PVCR) entre 2008 et 2014.

Tableau 4.4 : Principales caractéristiques du PVCR à Mayotte entre 2008 et 2014

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Part du PVCR dans le mix (%)	0,10%	0,50%	2,40%	5,30%	5,70%	5,90%	5,50%
Puissance PVCR installée au 31/12 [kWc]	538	2 100	7 967	12 584	13 104	13 175	13 261
Production électrique [MWh]	232,6	1279,3	6094,12	13851,33	15444,64	16758,83	16607,64
Taux moyen annuel de Réserve Primaire (%)			11,6%	14,3%	15,1%	15%	15,3%

Source : EDM

D'après la loi sur la transition énergétique, vers 2020, le territoire de Mayotte devra tendre vers 30% d'utilisation d'EnR sur son mix énergétique total. Cet objectif sera difficilement atteignable en se basant que sur le secteur électrique. Il faut aussi penser à s'appuyer sur le secteur du transport pour mettre en place un programme facilitant la démocratisation des voitures électriques étant donné que le réseau routier de l'île fait à peu près 181 km. Sachant que d'après nos recherches la voiture électrique la moins autonome peut parcourir 145 km avec une batterie de 17,6 kWh, nous pensons que c'est une piste de réflexion de la part des décideurs publics[88]. Afin d'atteindre cet objectif à la fois ambitieux et prometteur, un effort est demandé de la part de la collectivité départementale de Mayotte. Cet effort concerne notamment des moyens humains et logistiques à mettre rapidement en place pour un suivi régulier des actions sur les EnR sans oublier de mener un gros effort au niveau de la maîtrise de l'énergie pour limiter au maximum le gaspillage d'énergie.

4.1.1.3. 3 - Les potentiels EnR électriques de l'île

Au regard de sa position géographique par rapport à l'ensemble des départements français, Mayotte est considérée comme le territoire français ayant le nombre d'heures d'ensoleillement le plus élevé. En effet, la durée pendant laquelle le rayonnement solaire est maximal se situe environ à 1400 heures par an, à titre de comparaison elle est de 1 250 heures pour La Réunion. Ce constat place le territoire mahorais au niveau des territoires où il existe un fort potentiel de production électrique propre à partir du photovoltaïque. Pour information, le rayonnement horaire moyen journalier du territoire de Mayotte, relevé par la station météo de Dzaoudzi, se situe approximativement à 546 Wh/m² et celui de La Réunion, relevé par la station de Gillot, se situe approximativement à 532 Wh/m². D'après ces données, nous pouvons conjecturer que la production électrique à partir du PV sera meilleure sur le territoire de Mayotte que sur celui de La Réunion pour des modules semblables. En 2008, les premières installations de PV ont débuté sur le territoire mahorais pour atteindre en 2014, 72 installations de PV.

Un projet baptisé "OPERA" est en cours d'expérimentation à Mayotte pour permettre d'augmenter la capacité de production électrique à partir de PV. Le potentiel PV est encore très prometteur sur le territoire mahorais. D'une part en raison des avancées technologiques qui vont permettre de meilleures alternatives de stockage. D'autre part, peu d'habitations sont équipées en panneaux photovoltaïques au niveau de la toiture de leur logement et avec un soutien financier plus en phase avec les revenus et les besoins des ménages et à la hauteur de l'enjeu, le taux d'installation de panneaux photovoltaïques au sein des ménages pourrait s'envoler pour permettre à l'île de devenir autonome pour sa production électrique. Le potentiel de production PV au niveau des ménages pourrait atteindre plusieurs GWh annuellement. En se basant sur ces données factuelles, nous remarquons que le PV présente le plus gros potentiel et enjeu concernant la production électrique de Mayotte d'origine renouvelable. Le soutien de la filière photovoltaïque englobe plusieurs enjeux stratégiques et énergétiques notamment en matière d'approvisionnement énergétique, de développement industriel, de création d'emploi, de compétitivité et bien sûr de la lutte contre le changement climatique.

D'après le document du PPE, il existe des potentiels sur d'autres sources de production électrique d'origine EnR sur le territoire de Mayotte tels que l'hydraulique, l'éolien, le biogaz, la biomasse, la géothermie ou encore l'ETM. Cependant, l'exploitation de l'une ou l'autre de ces énergies contient une part importante d'aléas soit au niveau environnemental, économique ou social, par exemple sur le coût

d'investissement, de la durée pour mener à bien le projet, de la pollution sonore ou visuelle, etc. C'est pour cette raison, que nous avons fait le choix de nous concentrer que sur le plus gros potentiel avéré qui peut, à notre avis, à lui seul, couvrir les besoins électriques de la population mahoraise. Quelle surface de PV serait nécessaire pour couvrir les besoins énergétiques de ce département ? Nous allons tenter d'y apporter quelques éléments de réponse à cette question à la suite de ce chapitre. Cependant, ce qui nous intéresse le plus est de pouvoir lisser les pics de consommation électrique durant les heures de pointe afin d'alléger la production électrique à partir des centrales électriques.

4.1. 2 - Les bases de données existantes

Pour pouvoir mener à bien nos simulations sur la production électrique d'origine EnR et la consommation électrique sur Mayotte, nous nous appuyerons sur différentes bases de données dont les détails sont explicités dans cette section.

4.1.2. 1 - Les bases de données étudiées

Nous nous intéressons à l'observation de plusieurs bases de données pour pouvoir mener à bien notre étude. Nos bases de données se classent selon deux objectifs :

- Le premier objectif porte sur les données disponibles pour me permettre d'évaluer la consommation électrique du département de Mayotte heure par heure, cet objectif permet d'évaluer les besoins futurs du département;
- Le second objectif porte sur les données disponibles pour nous permettre d'évaluer la production électrique de l'île d'origine EnR heure par heure. Nous évaluerons les capacités de production de la ressource sélectionnée dans un autre paragraphe plus loin dans ce chapitre.

Pour la première catégorie de données, nous nous sommes appuyé en premier lieu sur les données que nous avons pu obtenir au niveau de différentes structures sur le territoire mahorais comme EDM[89], OME, IEDOM[90], conseil départemental de Mayotte et la préfecture (notamment le document sur la PPE² de Mayotte) pour les données liées à l'énergie, à la population, aux activités économiques sur l'île et aux principaux équipements électriques des ménages[27] [85] [87] [91].

Étant donné que l'obtention des données au niveau de la consommation électrique heure par heure sur le territoire a été infructueuse auprès du seul gestionnaire et distributeur d'électricité de l'île, malgré les nombreuses tentatives; nous nous sommes finalement concentrés sur les données existantes auprès de l'OME pour les années où elles sont disponibles. En effet, les publications de l'OME portent seulement sur trois années qui s'étalent de 2009 à 2011. Sur ces publications, nous retrouvons des données traitant l'ensemble des énergies utilisées sur le territoire, et plus spécifiquement les données concernant les particularités de la consommation électrique de l'île. Ces données sont précieuses, car elles permettent de faire une expertise sur la consommation électrique du territoire. Nous allons notamment nous baser sur ces données pour faire une projection de la consommation électrique du territoire pour les années suivantes. Ensuite, nous nous sommes également intéressés aux données de l'INSEE afin d'avoir des informations détaillées concernant la population de l'île, ses caractéristiques d'évolution sur les

² Programmation pluriannuelle de l'énergie de Mayotte 2016-2018 / 2019-2023

dernières années, les types de logements dominants sur Mayotte et leur taux d'électrification, ainsi que le nombre de ménages et leur taux d'équipement au niveau des postes de consommation électrique. Ces données permettront de faire une expertise de la situation des ménages sur l'île ainsi qu'une extrapolation sur les prochaines années quant à leur besoin électrique. Puis, nous nous sommes intéressés aux données existant auprès de l'IEDOM de Mayotte pour avoir des données en lien avec l'activité économique du territoire, notamment le PIB, la structure et l'évolution des activités économiques de l'île. Ces données permettront d'apporter un éclairage sur la structure des activités économiques sur le territoire et de voir leur conséquence au niveau de la consommation électrique. Les données issues du PPE relatives à la consommation électrique vont ramener encore plus de détails sur la consommation électrique de l'île ainsi que de faire une comparaison entre nos projections et les leurs sur différents types de projection de données. Ce recensement des données constitue une première étape vers la simulation d'un fichier horaire de consommation électrique. Une seconde étape devrait permettre de mettre en œuvre des lois de corrélation à l'échelle d'observation souhaitée. Pour l'heure ces bases de données nous ont avant tout servi de repère pour analyser les tendances et mettre en œuvre des estimations simplifiées à partir de fichiers horaires d'autres DOM.

Concernant la seconde catégorie de données, portant sur l'évaluation de la production électrique photovoltaïque au pas de temps horaire, nous nous basons sur les données météorologiques d'une année complète au niveau du département de Mayotte. Nous utiliserons la base de données de Météo-France de la station de Pamandzi. Sur cette base de données, nous retrouvons des données météorologiques en lien avec le rayonnement solaire, la vitesse du vent, et la température au pas de temps horaire. Ces données nous permettront d'évaluer au pas de temps horaire la production électrique sur l'île à partir des EnR.

Elles permettront notamment de connaître la surface de capteurs nécessaire pour tendre vers l'objectif fixé par le Grenelle de l'environnement pour le territoire de Mayotte qui est de tendre à l'horizon 2020 vers 30% d'EnR dans le mix énergétique global[92].

Par ailleurs, nous nous sommes appuyés sur des données d'EDF d'autres départements d'Outre-mer pour nous permettre d'évaluer la consommation électrique de Mayotte heure par heure sur une année complète. En effet, nous n'avons pas pu obtenir ces données auprès du producteur électrique et seul gestionnaire du réseau électrique de l'île qui est EDM. Par conséquent, nous allons nous servir des données des autres départements d'Outre-mer où les données ont été mises en ligne par EDF[93] pour pouvoir établir des relations qui permettront de reconstituer in fine celui du département de Mayotte.

Nous rappelons que l'évolution de la demande d'électricité repose principalement sur plusieurs critères. Les principaux critères sont les suivants :

- La progression de l'accès à l'électricité;
- L'évolution démographique (natalité, solde migratoire, décohabitation...);
- L'évolution de l'activité économique et des infrastructures publiques;
- L'accroissement du taux d'équipement des ménages.

Nous allons analyser ces principaux facteurs et mettre en relation nos bases de données avec la consommation électrique pour en évaluer la consommation dans le futur.

D'après la littérature, la demande de consommation électrique est étroitement liée aux conditions météorologiques[43] et à la variation des données démographiques et économiques[42]. En effet, une variation de la température peut entraîner une utilisation massive de la climatisation sur le territoire mahorais comme la présence de fortes précipitations ou de nuages peuvent influencer sur l'utilisation

des luminaires dans un logement. En ce sens, les données météorologiques heure par heure servent notamment à l'évaluation de la production électrique d'origine EnR, mais peuvent également servir à mieux prévoir la consommation électrique dans des conditions normales saisonnières. Les données démographiques et économiques, issues notamment de l'INSEE et l'IEDOM, influencent la consommation électrique. L'indicateur de la consommation électrique pour le facteur démographique, que nous allons considérer, sera l'augmentation du nombre de ménage, et au niveau économique ça sera le PIB.

Pour rappel, nous souhaitons effectuer l'évaluation de la consommation électrique de Mayotte heure par heure sur une année complète et de la production électrique de ce territoire à partir des EnR de la même manière. Cependant, l'ensemble de nos bases de données sont à l'échelle mensuelle ou annuelle excepté les données météorologiques qui sont au pas de temps horaire sur une année complète. Dès lors, nous mettrons donc en place une démarche qui permettra de faire une évaluation de la consommation électrique de l'île heure par heure sur une année complète afin de pouvoir confronter la consommation par rapport à la production électrique d'origine EnR. Comme énoncé dans les précédentes sections, à Mayotte, nous disposons des données de consommation électrique, mais au niveau mensuel et annuel pour certaines années. Nous allons prendre ces données existantes sur Mayotte au niveau des années sur lesquelles elles existent. Ensuite, nous verrons sur les autres départements ceux qui ont des données sur ces mêmes années, pour choisir le département correspondant comme département de référence pour l'évaluation des données sur le département de Mayotte. Ensuite, nous allons tracer la courbe de consommation de la différence entre les données de consommation du département de référence par rapport à Mayotte pour en ressortir une loi mathématique de régression linéaire. Puis, nous allons procéder à la validation de cette loi en procédant à l'évaluation des données de consommation électrique sur une année où nous avons des données de consommation.

Lorsque la loi sera validée, nous allons passer à l'étape suivante qui permettra d'évaluer la consommation électrique sur le département de Mayotte heure par heure sur une année complète.

4.1.2. 2 - Échelles d'observation

Dans un premier temps, nous allons observer les données au pas de temps horaire sur chaque jour de la semaine dans l'année. Cela permettra de visualiser la variation de la courbe de charge selon le type de journée. En effet, nous appellerons «jour ouvré» les jours de la semaine du lundi au vendredi, ensuite «jour férié» le dimanche et les jours de la semaine qui correspond à un jour férié au niveau du calendrier, et enfin «jour intermédiaire» la journée de samedi. Nous allons aussi examiner les données à l'échelle de l'ensemble du département de Mayotte, et les données commune par commune pour plus de détails afin de pouvoir en tirer les analyses adéquates à des échelles spatiales plus réduites. Les informations données sur le précédent paragraphe vont être mises en contribution dans l'étude que nous allons mener selon différentes observations que ce soit spatiales ou temporelles. Les données de la consommation électrique issues de l'OME seront analysées au pas de temps mensuel dans une année complète sur les trois années disponible pour l'ensemble du territoire.

Ensuite l'extrapolation se fera sur les années suivantes de la même manière. Celles issues de l'INSEE seront observées sur l'année tantôt par commune, tantôt sur l'ensemble du territoire en fonction des objectifs fixés. Les données de l'IEDOM seront observées sur l'année. En effet leur publication

majeure ne paraît que tous les ans sur l'essentiel des activités économiques du territoire. Concernant, des données horaires sur une année, nous ne disposons que des données de la station météorologique de Pamandzi qui se situe sur la Petite-Terre. Vu la superficie du territoire, même s'il existe certainement des microclimats, nous faisons l'hypothèse que les données météorologiques de Pamandzi reflètent les caractéristiques de l'ensemble de l'île concernant notre étude.

4.1.2. 3 - Inventaire précis des données

Tableau 4.5 : Échelle d'observation et types des données utilisées

Échelle d'observation	Types de données	
	Territoriale	Communale
Horaire	<ul style="list-style-type: none"> Fichier météo de Dzaoudzi Données sur la radiation horaire sur le territoire de Mayotte de la JRC³ Consommation horaire des journées les plus consommatrices de 2006 à 2014[94] 	
Mensuelle	<ul style="list-style-type: none"> Production électrique du territoire pour chaque mois en 2007, 2009, 2010 et 2011 	
Annuelle	<ul style="list-style-type: none"> Production électrique de 2002 à 2014 Consommation électrique de 2002 à 2014 Taux d'électrification du territoire en 2012 Population 2002, 2007 et 2012 <ul style="list-style-type: none"> Taux d'activité en 2012 Taux d'équipement des ménages en 2012 <ul style="list-style-type: none"> PIB de 2000 à 2014 PIB par habitant de 2000 à 2014 	<ul style="list-style-type: none"> Consommation électrique par commune en 2007, 2009, 2010 et 2011 Taux d'électrification en 2012 par commune Taux d'équipement des logements par commune en 2012 Taux d'activité par commune en 2012

Le Tableau 4.5 récapitule l'ensemble des données qui vont permettre d'analyser l'évolution de la consommation électrique sur le territoire mahorais. Ces données vont aussi permettre de simuler à partir des outils développés durant cette thèse le pilotage entre consommation et production électrique sur Mayotte. Dans cette section, nous allons faire un inventaire de l'ensemble des données disponibles en commençant par les données au niveau horaire, puis mensuel pour finir avec les données au niveau annuel.

Au niveau horaire, nous avons un fichier de données météorologiques de la station de Pamandzi se situant sur la Petite-Terre. Nous avons aussi recherché une autre base de données afin de pouvoir par la suite valider notre Outil et nous avons trouvé qu'il existe une base de données au niveau du site internet de PVGIS[95]. Étant donnée que nous travaillons exclusivement sur l'évaluation de la production photovoltaïque sur le territoire de Mayotte, ce site se retrouve être d'une grande importance afin de comparer les données que nous allons obtenir à partir de l'outil développé par rapport à cet outil internet en plus de la collecte de données précieuses sur l'irradiation. PVGIS est un outil gratuit pour

³ Joint Research Centre, Ispra, Italy

l'estimation de la production de système photovoltaïque, connecté ou pas au réseau, en Europe ou en Afrique. Il a été développé par le centre de recherche de l'institut pour l'environnement et le développement durable de la commission européenne, plus connu sous le nom de JRC (Joint Research Centre). À partir de ce site internet, il est possible de ressortir des données sur le rayonnement journalier moyen sur n'importe quel endroit géographique au niveau du continent européen et africain. Nous avons aussi trouver une autre base de données sur internet, plus précisément du site internet infoclimat.fr[96].

Nous avons aussi des données de consommation électrique horaire sur une journée de 2006 à 2014. Ces consommations horaires journalières reflètent le jour dont la puissance maximale appelée est au plus haut. Ces données ont été obtenues auprès du document portant sur la programmation pluriannuelle de l'énergie de Mayotte. Ces données étaient sous format graphique, et j'ai utilisé un logiciel dénommé "Digitizer" afin de pouvoir récupérer l'ensemble de ces données sous format tableau. Le Tableau 4.6 représente les données sur le jour où l'appel de puissance sur le réseau était à son maximum de l'année 2006 à 2014.

Tableau 4.6 : Journée d'appel de la puissance maximale (MW) sur Mayotte de 2006 à 2014

	Journée du 13/12/2006	Journée du 13/11/2007	Journée du 02/12/2008	Journée du 09/12/2009	Journée du 17/03/2010	Journée du 01/02/2011	Journée du 15/02/2012	Journée du 03/12/2013	Journée du 20/03/2014	Moyenne [MW]
00h	21,49	23,54	25,95	29,76	31,1	32,9	34,71	38,5	40,13	30,90
01h	19,58	22,2	24,52	28,24	30,05	30,52	32,62	35,44	37,26	28,94
02h	18,44	20,85	24,05	28,05	29,38	29,29	31,28	34,59	35,26	27,91
03h	17,68	21,43	23	27,1	28,62	28,62	30,42	33,35	34,31	27,17
04h	17,87	20,77	20,81	26,14	28,43	28,14	29,75	32,11	33,45	26,39
05h	18,16	21,73	22,9	26,81	28,24	27,57	30,03	31,83	32,69	26,66
06h	18,84	22,22	24,81	27,48	28,62	28,43	30,22	31,93	32,31	27,21
07h	20,66	24,05	26,71	27,86	30,24	29,67	30,5	32,6	33,27	28,40
08h	25,06	28,77	30,71	33,48	33,38	34,81	36,49	37	36,43	32,90
09h	26,21	30,5	32,9	35,1	36,52	36,43	38,49	40,92	40,92	35,33
10h	26,59	30,51	33,38	35,95	36,9	36,71	39,53	41,88	43,99	36,16
11h	26,6	30,51	33,38	36,33	37,67	37,1	39,82	42,08	43,7	36,35
12h	26,22	29,27	32,52	35,67	38,24	38,05	39,62	38,17	39,31	35,23
13h	26,8	28,98	32,33	35,19	37,29	36,9	38,76	41,51	44	35,75
14h	26,99	28,22	33,1	36,43	37,76	37	39,52	40,47	44,39	35,99
15h	26,52	28,99	32,71	36,33	38,05	37,29	40,66	42,19	45,44	36,46
16h	25,66	27,65	30,9	35,19	36,62	35,29	38,65	41,91	43,82	35,08
17h	24,04	26,21	30,43	32,81	34,24	34,81	35,89	40,77	42,1	33,48
18h	25,29	27,75	29,95	32,62	34,14	34,05	35,02	37,9	39,24	32,88
19h	29,31	32,09	35,19	38,33	41,29	38,33	40,64	41,35	41,63	37,57
20h	28,16	30,74	34,33	37,19	40,33	42,33	43,4	45,17	46,42	38,67
21h	27,12	29,98	32,33	36,33	39,38	40,81	42,25	44,32	45,75	37,59
22h	25,11	27,86	30,14	34,24	36,24	39	39,48	43,27	44,61	35,55
23h	23,11	25,27	28,24	31,19	34,05	33,29	36,91	41,56	42,51	32,90

Source : PPE 2016-2018/2019-2023 de Mayotte

Concernant les données de consommation électrique, nous n'avons pas obtenu de données sur le cas de Mayotte. Cependant, afin de pouvoir estimer la consommation horaire sur le territoire mahorais, nous allons nous appuyer sur des données de production horaire d'un autre département français se trouvant sur l'Océan Indien, qui est le département de La Réunion. La méthode utilisée pour réaliser cette tâche est présentée dans une autre section ci-dessous.

Pour le niveau mensuel, nous sommes en présence d'un seul type de données, c'est la production électrique du territoire pour chaque mois des années 2007, 2009, 2010 et 2011. Considérant qu'au niveau du document du PPE de Mayotte, il est rapporté que les pertes réseau sont aux alentours de 8,6%, il est possible de pouvoir évaluer la consommation sur chaque mois pour les années 2009, 2010

et 2011. Ces données de production électrique ont été obtenues au niveau du document du bilan énergétique à Mayotte sur les trois années citées précédemment. Le Tableau 4.7 suivant illustre les productions précitées.

Tableau 4.7 : Productions mensuelles d'électricité à Mayotte pour 2007, 2009, 2010 et 2011

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total
Production nette totale en 2007 [MWh]	16 659	15 167	17 186	16 545	16 764	15 333	14 946	15 389	15 699	17 140	17 363	18 035	196 226
Production nette totale en 2009 [MWh]	20 519	18 642	21 092	20 626	20 220	18 913	18 081	18 411	18 909	20 675	20 736	21 858	238 682
Production nette totale en 2010 [MWh]	21 622	21 096	23 725	23 030	22 555	20 618	19 359	19 669	20 024	21 408	21 670	22 760	257 536
Production nette totale en 2011 [MWh]	23 035	21 142	23 370	22 944	22 547	20 740	19 781	20 071	20 819	21 363	23 106	22 996	261 914

Source : BEM

En appliquant le ratio de 8,6% de perte réseau depuis le lieu de production jusqu'au lieu de consommation, on peut déduire la consommation électrique du territoire de Mayotte sur chaque mois des années 2007, 2009, 2010 et 2011. Ce qui nous donne le Tableau 4.8 ci-dessous.

Tableau 4.8 : Estimation des consommations électriques mensuelles de Mayotte en 2007, 2009, 2010 et 2011

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total
Consommation totale en 2007 [MWh]	15 226	13 863	15 708	15 122	15 322	14 014	13 661	14 066	14 349	15 666	15 870	16 484	179 351
Consommation totale en 2009 [MWh]	18 754	17 039	19 278	18 852	18 481	17 286	16 526	16 828	17 283	18 897	18 953	19 978	218 155
Consommation totale en 2010 [MWh]	19 763	19 282	21 685	21 049	20 615	18 845	17 694	17 977	18 302	19 567	19 806	20 803	235 388
Consommation totale en 2011 [MWh]	21 054	19 324	21 360	20 971	20 608	18 956	18 080	18 345	19 029	19 526	21 119	21 018	239 389

Pour finir, au niveau annuel, nous avons des données de production électrique de 2002 à 2014 représentant les parts de production électrique sur le territoire mahorais d'origine fossile et EnR comme indiqué au niveau du Tableau 4.3.

Nous avons aussi des données sur la consommation électrique sur le territoire de Mayotte par commune de 2007, 2009, 2010 et 2011. Ces données sur la consommation des 17 communes de Mayotte sont présentées au niveau du Tableau 4.9 ci-dessous. Il est à noter qu'à partir de 2009, il y a l'apparition d'une offre de consommation électrique dénommée "ANKIBA" qui se traduit par économie ou réserve en shimaoré, et qui est répartie de façon disparate sur l'ensemble des communes. C'est une opération lancée par EDM envers les clients particuliers et petits professionnels, visant à maîtriser fortement leur consommation d'électricité. Toutefois, il représente un faible pourcentage par rapport à la consommation totale.

Tableau 4.9 : Surface et Consommation d'électricité sur Mayotte par commune pour 2007, 2009, 2010 et 2011 [MWh]

	Communes de Mayotte	Surface [km ²]	Population (2012)	2007 [MWh]	2009 [MWh]	2010 [MWh]	2011 [MWh]
Communauté de Commune du NORD	ACOUA	13	4 915	2 045	2 337	2 724	2 730
	BANDRABOUA	32	10 305	4 884	6 254	7 857	7 679
	KOUNGOU	28	26 715	17 474	24 395	28 987	33 595
	MTZAMBORO	14	8 078	3 194	3 736	4 411	4 441
	Sous-total	87	50 013	27 597	36 722	43 979	48 445
Communauté de Commune du Centre-Ouest	CHICONI	8	7 305	3 159	4 090	4 271	4 679
	M'TSANGAMOUJ I	22	6 472	2 665	3 035	3 626	3 674
	OUANGANI	19	9 937	3 224	4 575	5 327	3 959
	SADA	12	10 484	4 714	6 700	7 119	7 075
	TSINGONI	35	10 618	8370	9 794	10 635	10 708
	Sous-total	96	44 816	22 132	28 194	30 978	30 095
Communauté de Commune du Centre-Est	MAMOUDZOU	42	58 197	72 394	90 371	94 592	90 795
	DEMBENI	39	11 071	4 342	6 483	6 913	6 760
	Sous-total	81	69 268	76 736	96 854	101 505	97 555
Communauté de Commune de Petite-Terre	DZAOUDZI	7	14 685	17 271	18 691	19 114	21 740
	PAMANDZI	4	10 201	14 053	16 677	17 100	16 330
	Sous-total	11	24 886	31 324	35 368	36 214	38 070
Communauté de Commune du Sud	BANDRELE	36	8 044	4 085	5 505	6 459	6 148
	BOUENI	14	6 583	3 223	4 458	4 662	4 788
	CHIRONGUI	28	8 295	4 697	6 105	6 384	6 480
	KANI-KELI	21	5 196	2 650	3 450	3 860	3 812
	Sous-total	99	28 118	14 655	19 518	21 365	21 228
Ankiba					461	1 854	4 708
Total		374	217 101	172 445	217 261	235 895	239 834

Source : INSEE, BEM 2007, 2009, 2010 et 2011

À titre d'information, d'après le recensement de l'INSEE de 2012 sur Mayotte, le taux d'électrification du territoire était de 93,6%, son taux d'activité était de 45,9%. Les données du territoire de Mayotte relatives à l'évolution de son PIB, de son PIB/habitant, de sa population ainsi que de sa consommation électrique de l'année 2000 à l'année 2014 sont données sur le Tableau 4.10 ci-dessous.

Tableau 4.10 : Évolution du PIB, de la population, du PIB/Habitant et de la production électrique à Mayotte entre 2000 et 2014

Année	PIB de Mayotte (en €)	Population	PIB par habitant (en €)	Production électrique (MWh)
2000	579 000 000	131 320	3928	81 644
2001	626 000 000	153 854	4 077	97 777
2002	663 000 000	160 265	4 155	115 057
2003	751 000 000	166 836	4 554	130 043
2004	854 000 000	172 008	5 026	139 125
2005	957 000 000	177 340	5 464	156 230
2006	1 103 000 000	182 838	6 112	171 038
2007	1 188 000 000	186 452	6 390	196 225
2008	1 388 000 000	192 232	7 266	217 793
2009	1 383 000 000	198 191	7 058	238 682
2010	1 489 000 000	203 542	7 403	257 537
2011	1 556 000 000	209 038	7 534	261 915
2012	1 796 000 000	212 645	8 365	270 992
2013	1 770 000 000	218 386	8 034	285 014
2014	1 936 300 000	224 282	8 603	299 297

Source : INSEE, BEM

Les données de population et de production électrique indiquées en petit caractère italique correspondent à des données estimées à partir des données de l'INSEE, du bilan énergétique mahorais et du document du PPE de Mayotte.

Concernant la population de Mayotte, on a pu trouver auprès de l'INSEE des données relatives à l'évolution du taux d'équipement de la population mahoraise de 2002, 2007, 2011 et 2012. Ces données sont présentées sur le Tableau 4.11 ci-dessous.

Tableau 4.11 : Taux d'équipement de la population à Mayotte en 2002, 2007, 2011 et 2012

	Taux d'équipement 2002	Taux d'équipement 2007	Taux d'équipement 2011	Taux d'équipement 2012
Réfrigérateur	44,4%	56,4%	68,3%	71,5%
Congélateur	30%	53,8%	71%	71%
Lave-linge	13%	20,4%	32,4%	-
Téléviseur	61,30%	82%	88,4%	80,6%
Ordinateur	7,4%	16,7%	19,6%	30,5%
Climatiseur	4%	8%	13,6%	-
Four à micro- onde	-	-	35,5%	-

Source : INSEE

Jusqu'ici, nous avons présenté des données spécifiques au territoire de Mayotte, maintenant, nous allons présenter aussi quelques données permettant d'effectuer le positionnement du département de Mayotte, selon différents critères, par rapport aux autres départements d'outre-mer et surtout par rapport à la France continental. Nous nous focalisons spécifiquement sur le département de La Réunion et de La Guyane, car ce sont les deux départements qui partagent quelques points communs avec le département de Mayotte.

Effectivement, La Réunion se trouve dans la même zone géographique que Mayotte dans l'océan Indien, d'autant plus que pour beaucoup de services relevant de l'État français, Mayotte dépend de son

voisin, le département de La Réunion. Par exemple, pour le bilan énergétique, il est effectué par l'ADEME Océan Indien dont l'antenne principale se trouve à La Réunion.

Pour la Guyane, les points communs avec Mayotte résident sur la position par rapport à l'équateur, et sur le fait que la population guyanaise est proche de la population mahoraise

La comparaison des données, entre La France continental et les départements de Mayotte, de La Réunion et de La Guyane va porter sur les données concernant :

- La population;
- Le PIB;
- La superficie;
- La consommation annuelle électrique;
- La consommation annuelle électrique par secteur d'activité;
- Les tonnes de fuels importées dans l'année.

Ci-dessous sont présentés des tableaux reprenant les données de 2011 et de 2014 pour les paramètres précités.

Tableau 4.12 : Évolution de la population entre 2011 et 2014 sur La Guyane, Mayotte, Métropole et La Réunion en milliers de personne

	Guyane	Mayotte	France continental	Réunion
2011	237 549	209 038	63 070 344	828 581
2014	252 338	229 113	64 027 784	844 900

Source : INSEE et IEDOM

Tableau 4.13 : Évolution du PIB et du PIB par habitant entre 2011 et 2014 sur La Guyane, Mayotte, Métropole et La Réunion en milliers d'euros

	Guyane	Mayotte	France continental	Réunion
2011	3 622 000 000	1 575 000 000	2 563 344 972 692	16 103 000 000
2011 par habitant	15 294	7 630	31 536	18 902
2014	3 908 000 000	1 839 914 047	2 532 903 572 387	17 534 000 000
2014 par habitant	16 057	8603	38 093	20 725

Source : INSEE et IEDOM

Tableau 4.14 : Superficie des départements de La Guyane, Mayotte, Métropole et de La Réunion [km²]

Guyane	Mayotte	France continental	Réunion
83 846	375	549 087	2 520

Source : Wikipédia

Tableau 4.15 : Consommation annuelle d'électricité [MWh]

	Guyane	Mayotte	France continental	Réunion
2011	853 250	239 834	431 473 000	2 498 500
2014	880 200	273 703	429 147 000	2 597 000

Source : INSEE et IEDOM

Tableau 4.16 : Consommation annuelle d'électricité par habitant en 2011 et 2014 [kWh/hab]

	Guyane	Mayotte	France continental	Réunion
2011	3 592	1 147	6 841	3 015
2014	3 488	1 195	6 703	3 074

Source : BEG, BEM, BEF et BER en 2012 et 2015 plus IEDOM

Nous observons que la consommation annuelle d'électricité par habitant entre 2011 et 2014 diminue en Guyane et en France, tandis qu'elle augmente à Mayotte et à La Réunion. Parmi ces quatre territoires, c'est le territoire de la France continentale qui possède la consommation d'électricité la plus élevée ramenée au nombre d'habitant sur le territoire suivi de la Guyane, ensuite de La Réunion et pour finir par Mayotte. Nous émettons l'hypothèse selon laquelle, plus un territoire arrive à répondre aux besoins électriques de sa population et plus elle sera prospère.

Tableau 4.17 : Consommation annuelle d'électricité par secteur d'activité [MWh] en 2011 et 2014

		Guyane	Mayotte	Métropole⁴	Réunion
2011	Résidentiel	283 000	119 555	153 516 000	1 100 000
	Industriel	24 000	90 459	127 930 000	261 000
	Tertiaire	442 000	29 820	150 027 000	1 137 000
2014	Résidentiel	299 000	142 000	151 190 000	1 171 000
	Industriel	43 000	66 000	125 604 000	354 000
	Tertiaire	434 000	63 000	152 353 000	1 073 000

Source: BEG, BEM, BEF et BER en 2012 et 2015

Tableau 4.18 : Tonne de fuels importés dans l'année (tep)

	Guyane	Mayotte	Métropole	Réunion
2011	259 761	93 006	157 400 000	12 893 000
2014	187 120	89 044	154 700 000	11 701 000

Source: BEG, BEM, BEF et BER en 2012 et 2015

4.1. 3 - Analyse des données

Sur cette section, nous effectuons l'analyse de l'ensemble des données en notre possession. Cette analyse se fait en gardant la même approche que précédemment, c'est-à-dire que nous allons commencer à présenter l'analyse des données au niveau horaire, ensuite au niveau mensuel pour finir par le niveau annuel.

Au niveau horaire, nous avons des données que nous allons utiliser pour évaluer la production ou la consommation électrique sur Mayotte. Pour la production électrique, il existe différentes bases de données disponibles à partir de plusieurs outils par exemple PVsyst, PVGIS ou encore RETScreen, mais peu possèdent des données au niveau horaire. Sur ces outils la majorité des données météorologiques représentent des mois types ou des journées types obtenues par satellite.

⁴ Nous avons reclassé la classification des secteurs d'activité pour la métropole pour avoir la même typologie qu'au niveau des DOM. Par exemple, j'ai inclus la sidérurgie dans l'industrie, or dans le bilan énergétique ce n'est pas compris dedans. [BEF 2011, p41]

Dans notre cas d'étude, nous souhaitons avoir des données au pas de temps horaire. Et comme les données sur les autres bases de données sont au niveau du mois type ou de la journée type, nous avons fait le choix de choisir la base de données obtenu auprès de notre laboratoire⁵ sur une année complète et surtout au pas de temps horaire sur toute une année, et plus précisément pour l'année 2006. Nous allons donc utiliser la base de donnée météo se situant sur Pamandzi en Petite-Terre pour évaluer la production électrique d'origine renouvelable. Comme Mayotte est un territoire insulaire d'une superficie de seulement 375 km², que son relief ne présente pas de grands massifs de montagnes qui peuvent modifier son climat de manière très accru, nous faisons l'hypothèse que les données météorologiques de Pamandzi peuvent être considérées comme représentatives de l'ensemble du territoire de Mayotte

Pour l'évaluation de la consommation électrique sur le territoire de Mayotte, nous n'avons pas du tout de base de données sur la consommation au pas de temps horaire. Les données que nous avons pu obtenir concernent les consommations par secteur d'activité sur des années complètes. Les données de consommation électrique aux niveaux mensuels et horaires sont absentes. Nous avons tenté à partir des séries temporelles, et notamment en utilisant la fonction SARIMA du logiciel R[97] [98], d'estimer la consommation sur une année complète au niveau horaire sur le territoire de Mayotte.

Malheureusement, la démarche s'est avérée infructueuse sur R, car pour réaliser une estimation de ce genre, il faut au préalable être en possession de certaines données sur des années antérieures. Le seul cas où nous pourrions nous passer d'une base de données sur un temps allongé reste sur les prédictions du jour au lendemain. Dans notre cas, il nous faut estimer les données sur une année complète et nous ne disposons d'aucunes données à ce propos. C'est pour cela que nous avons pris la décision de nous baser sur les données de production horaire récupérées auprès d'EDF[99] concernant le département de La Réunion.

À partir de ces données sur la production horaire sur le département de La Réunion, nous allons évaluer les données horaires sur le département de Mayotte. Cette évaluation se fera en suivant deux étapes.

La première consiste à trouver un rapport entre la production électrique horaire à La Réunion et à Mayotte. Pour cela, nous disposons des données sur la courbe de charge au pas de temps horaire à La Réunion et à Mayotte. Pour La Réunion, sur le document de PPE[100] à la page 9, nous observons les courbes de charge type en été et en hiver sur le territoire. Pour Mayotte, sur le document de PPE[101] à la page 23, nous observons les courbes de charge où l'appel de puissance a été le plus élevé entre 2006 et 2014. L'extraction des données de ces courbes de charge se fait en utilisant un logiciel appelé "Digitizer".

La seconde étape consiste à effectuer les calculs en faisant attention à l'insertion des données sur les heures correspondantes. Avant de réaliser ces deux étapes, nous devons d'abord nous assurer que la courbe de charge annuelle possède la même tendance sur le territoire de Mayotte et de La Réunion. Tous ces paramètres seront présentés sur la section 4.3. Les Tableau 4.6 et Tableau 4.19 montrent les puissances horaires appelées pour Mayotte et La Réunion.

Au niveau du Tableau 4.6, nous remarquons que les dates indiquées renvoient toutes à des mois correspondants à l'été austral. Faute de données sur l'hiver austral, nous allons nous contenter de ces données sur l'été, car elles représentent les appels de puissance maximum sur Mayotte correspondant à la consommation maximum. Dans mon cas d'étude, cette situation représente les cas les plus

⁵ Laboratoire PIMENT (Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'environnement et le bâtiment)

défavorables au niveau de la consommation électrique. Nous supposons que c'est la courbe de charge moyenne de notre journée type pour Mayotte. Nous notons que sur le territoire mahorais les appels de puissance varient entre 26,39 MW à 38,67 MW qui représentent respectivement les appels de puissance de 04h et de 20h sur la période 2006-2014. Le soir vers 21h les appels de puissance diminuent jusqu'à vers 05h du matin, puis augmentent doucement jusqu'à vers 08h. Ensuite, l'appel de puissance est légèrement accentué et continue d'augmenter jusqu'à vers 16h. Puis, il décroît un peu pour repartir à la hausse vers 19h jusqu'à vers 21h. Nous remarquons que les pics de consommation électrique sur le territoire mahorais se situent entre 19h et 21h. Cependant, les données entre 09h et 16h ne sont pas éloignées des données des pics, la différence est très minime comparée aux données des autres heures.

Tableau 4.19 : Puissance moyenne appelée sur le réseau à La Réunion en été et hiver [MW]

Heure	Donnée journée-type été (MW)	Donnée journée-type hiver (MW)	Moyenne journée-type (MW)
00h	285,36	245,59	265,47
01h	265,22	240,77	253,00
02h	261,48	223,90	242,69
03h	255,21	222,74	238,98
04h	254,00	226,42	240,21
05h	276,79	240,97	258,88
06h	319,77	272,49	296,13
07h	365,27	313,67	339,47
08h	395,62	341,54	368,58
09h	433,57	351,26	392,41
10h	439,93	361,01	400,47
11h	446,29	364,66	405,48
12h	436,24	348,99	392,61
13h	436,29	344,20	390,24
14h	301,26	343,04	322,15
15h	422,51	339,46	380,99
16h	411,19	338,30	374,74
17h	301,41	338,35	319,88
18h	301,46	363,81	332,64
19h	415,14	344,51	379,83
20h	301,57	343,35	322,46
21h	301,62	334,93	318,28
22h	301,67	330,14	315,91
23h	314,38	268,55	291,47

Source : PPE de La Réunion

Le Tableau 4.19 permet de visualiser les données d'appels de puissance en été et hiver austral, ce qui m'a permis de ressortir des données d'appels de puissance moyenne d'une journée type annuelle pour le territoire réunionnais. Les appels de puissance moyenne varient entre 238,98 MW à 405,48 MW qui représentent respectivement les appels de puissance de 03h et de 11h sur la journée type. Le soir vers 20h les appels de puissance décroît jusqu'à vers 03h du matin, puis augmente légèrement jusqu'à vers 05h. Vers 06h, l'appel de puissance subit une augmentation un peu plus élevée jusqu'à vers 11h. Ensuite, il décroît un peu jusqu'à vers 14h. Puis, il y a une hausse vers 15h pour après décroître jusqu'à vers 18h. Vers 18h, il repart à la hausse pour décroître vers 20h. Nous observons que les pics de consommation se situent entre 09h et 16h avec une légère anomalie pour 14h. Entre 18h et 19h, l'appel de puissance n'est pas éloigné de certains appels de puissance entre 06h et 11h. Nous donnons ci-dessous un graphique représentant les profils moyens de production sur la journée type annuelle pour Mayotte et La Réunion. Puis, nous traçons aussi les moyennes mobiles de ces deux courbes pour vérifier la tendance et aplanir les fluctuations des profils de production de ces deux courbes.

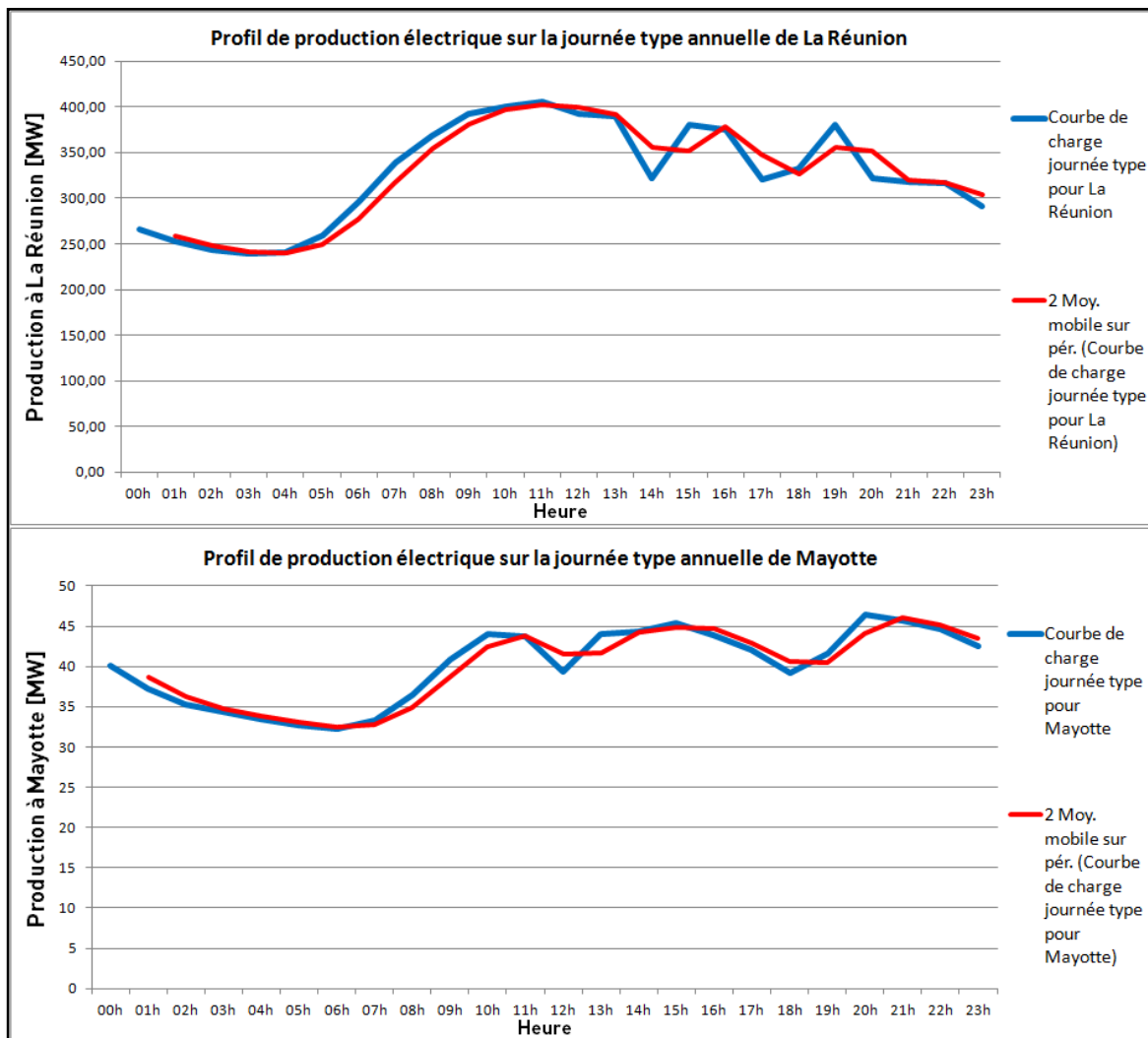


Figure 4.5 : Profils de production électrique sur la journée type annuelle (La Réunion et Mayotte)

Cette Figure 4.5 permet de visualiser que les courbes de moyennes mobiles, des profils de production horaire électrique du territoire de Mayotte et de La Réunion sur la journée type annuelle, possèdent les mêmes tendances, à quelque exception près, sur les heures de la journée. Pour La Réunion, ce maximum est atteint en fin de matinée tandis que pour Mayotte c'est en début de soirée que le maximum est atteint. Ce phénomène peut-être expliqué par la présence de plus d'industrie à La Réunion qu'à Mayotte.

Pour les données au pas de temps mensuel, nous disposons des données de production électrique sur le territoire de Mayotte pour chaque mois des années 2007, 2009, 2010 et 2011 obtenues auprès du BEM. Nous avons pu aussi obtenir des données de production mensuelle sur les années 2015 et 2016 sur le territoire de Mayotte. Ces données sont essentielles, car elles vont permettre d'estimer l'évolution de la production électrique sur l'île et de pouvoir visualiser à l'aide des courbes de charge mensuelle sur l'année la tendance de ces courbes par rapport à ceux de l'île de La Réunion. En effet, comme nous n'avons aucune donnée sur la consommation horaire de Mayotte, nous nous basons sur les données de production horaire du territoire de La Réunion pour évaluer la consommation sur Mayotte. Des détails de notre démarche sont donnés à la section 4.3. Nous savons que la production électrique répond à une demande de consommation électrique sur l'île : nous pourrions ainsi estimer la consommation à partir

des données de production en le multipliant par le taux de pertes que nous pouvons trouver sur le document du PPE.

Par ailleurs, à l'aide du logiciel R qui est dédié aux statistiques et à l'analyse des données, nous avons pu à l'aide d'un package dénommé "forecast" et d'une fonction dénommée "auto.arima" faire une prévision de la production électrique sur le territoire de Mayotte mois par mois de l'année 2007 à l'année 2025. Nous avons aussi réalisé la même chose pour le territoire de La Réunion en se basant sur les données issues du bilan énergétique réunionnais (BER). Pour Mayotte, nous nous sommes basés sur les données de 2007, 2009, 2010, 2011, 2015 et 2016 toutes issues de données mesurées obtenues sur le BEM ou à EDM. Les données mensuelles de 2008, 2012, 2013 et 2014 ont été obtenues en utilisant une projection à partir du logiciel Excel de Microsoft en s'aidant des courbes des tendances avec le modèle linéaire et de puissance suivant les cas rencontrés en fonction du degré de R^2 qui désigne la représentativité de la projection. Plus R^2 est proche de 1 et plus la projection est représentative et inversement. Le reste des projections sur les autres années sont réalisées sur le logiciel R. Ces projections permettent d'avoir une idée de la production et de la consommation électrique futures pour pouvoir effectuer une comparaison avec les données simulées à partir de l'outil développé.

Le Tableau 4.20 ci-dessous présente les données de production électrique mensuelle sur le territoire de Mayotte et de La Réunion de 2009, 2010, 2011, 2015 et 2016.

Tableau 4.20 : Production électrique 2009, 2010, 2011, 2015 et 2016 en MWh (Mayotte et Réunion)

Mois	Département									
	Mayotte					Réunion				
	2009	2010	2011	2015	2016	2009	2010	2011	2015	2016
Janvier	20519	21622	23035	25086	27692	230221	231891	231808	255629	257710
Février	18642	21096	21142	24564	26157	213976	221930	227632	233472	255043
Mars	21092	23725	23370	26695	30099	229247	239265	244164	253766	264676
Avril	20626	23030	22944	26251	28470	217116	226206	230397	243191	244880
Mai	20220	22555	22547	25525	26617	209127	220883	224937	232930	234706
Juin	18913	20618	20740	23892	24224	202700	209930	211516	223708	225186
Juillet	18081	19359	19781	22943	22459	208597	212461	213880	227900	233863
Août	18411	19669	20071	21977	23278	213141	221681	225378	233714	239398
Septembre	18909	20024	20819	22873	23218	207367	218090	222108	230173	235013
Octobre	20675	21408	21363	25865	23340	224519	229128	234058	245228	245353
Novembre	20736	21670	23106	26151	26600	224814	229720	238983	245830	249500
Décembre	21858	22760	22996	27313	27004	237214	238290	244980	266076	256375
Total	238	257	261	299	309	2 618	2 699	2 749	2 891	2 941
	682	536	914	135	158	039	475	841	617	703

Source: BEM, EDM, BER, EDF

Tableau 4.21: Variation de la production électrique (Mayotte et Réunion)

Mois	Département					
	Mayotte			Réunion		
	Variation 2010-2009	Variation 2011-2010	Variation 2016-2015	Variation 2010-2009	Variation 2011-2010	Variation 2016-2015
Janvier	5,38%	6,54%	10,39%	0,73%	-0,04%	0,81%
Février	13,16%	0,22%	6,49%	3,72%	2,57%	9,24%
Mars	12,48%	-1,50%	12,75%	4,37%	2,05%	4,30%
Avril	11,66%	-0,37%	8,45%	4,19%	1,85%	0,69%
Mai	11,55%	-0,04%	4,28%	5,62%	1,84%	0,76%
Juin	9,01%	0,59%	1,39%	3,57%	0,76%	0,66%
Juillet	7,07%	2,18%	-2,11%	1,85%	0,67%	2,62%
Août	6,83%	2,04%	5,92%	4,01%	1,67%	2,43%
Septembre	5,90%	3,97%	1,51%	5,17%	1,84%	2,10%
Octobre	3,55%	-0,21%	-9,76%	2,05%	2,15%	0,05%
Novembre	4,50%	6,63%	1,72%	2,18%	4,03%	1,49%
Décembre	4,13%	1,04%	-1,13%	0,45%	2,81%	-3,65%
Moyenne	7,93%	1,76%	3,32%	3,16%	1,85%	1,79%

Nous remarquons que pour les deux territoires les variations au niveau de la production électrique ont tendance à diminuer au fil des années. Les variations sur les mois d'été sont en général beaucoup plus élevées que les variations sur les autres mois. Concernant Mayotte, en 2011, il y a eu un grand mouvement social qui a paralysé l'île durant plusieurs mois et qui a fortement affecté les activités sur l'île. C'est ce qui explique le faible taux de variation de la production électrique de l'île entre 2010 et 2011. Notons, néanmoins que la variation de production électrique sur le territoire réunionnais est moins élevée que sur le territoire de Mayotte. Nous pouvons tirer la conclusion que Mayotte est encore dans une phase de grand développement par rapport à La Réunion et que ce territoire a besoin de plus en plus d'énergie chaque année pour répondre à ce développement sur les années présentées ici.

Au niveau annuel, nous avons réussi à récupérer des données tant au niveau de la production que de la consommation électrique sur Mayotte. Nous avons obtenu des données sur la production et consommation électrique sur le département de Mayotte entre 2002 et 2014. Mais ceci n'est pas totalement vrai, car pour 2003 au niveau de la production, nous avons estimé la donnée à l'aide d'une régression linéaire des autres données avec le logiciel Excel de Microsoft, en utilisant l'équation obtenue quand nous avons tracé la courbe de tendance. L'équation de la régression linéaire obtenue sur Excel est de la forme $Y = Ax + B$:

Équation 6 : équation pour estimer la production électrique de 2003 à 2005 sur Mayotte

$$Y = 16160x + 97556 \text{ avec } R^2 = 0,9834$$

Pour la consommation, les données de 2003, 2004 et 2005 ont été estimées à partir des données de production. Nous avons remarqué que le rapport entre la production et la consommation électrique sur Mayotte était de 1,13 sur les années 2003, 2004 et 2005. Nous avons donc fait le choix de diviser la production par ce rapport sur ces années afin d'évaluer la consommation électrique sur ces trois années. Les autres données ont été obtenues sur le BEM et le bilan énergétique de la France métropolitaine de 2014. Le Tableau 4.22 ci-dessous présente ces données de production et de consommation électrique de 2002 à 2014.

Tableau 4.22 : Évolution de la production et de la consommation électrique entre 2002 et 2014 sur Mayotte

Année	Production électrique [MWh]	Consommation électrique [MWh]	Variation entre consommation et production électrique
2002	115 057	101 730	-11,6%
2003	129 876	114 935	-11,6%
2004	139 125	123 119	-11,6%
2005	156 230	138 257	-11,6%
2006	171 038	151 203	-11,6%
2007	196 225	172 445	-12,1%
2008	217 793	190 570	-12,5%
2009	238 682	217 261	-9,0%
2010	257 537	235 895	-8,4%
2011	261 915	239 834	-8,4%
2012	270 992	245 800	-9,3%
2013	285 014	260 500	-8,6%
2014	299 297	273 703	-8,6%

Source : BEM, BEF 2014

Nous remarquons que l'intensité énergétique du département de Mayotte a plus que doublé entre 2002 et 2009. En l'espace de 7ans, la production et la consommation électriques ont connu respectivement une augmentation de 114% et de 107%. Puis, cette intensité énergétique a légèrement augmenté, avant de s'estomper sur les autres années de notre tableau. En effet, entre 2002 et 2008, la variation entre la consommation et la production électrique est de deux chiffres, ensuite, cette variation est retombée à un chiffre à partir de 2009.

Sur le BEM 2007, 2009, 2010 et 2011, nous avons récupéré des données sur la consommation électrique par commune. Pour rappel, à partir de 2009, il y a eu à Mayotte une offre de consommation appelée "Ankiba" qui signifie économie et qui consiste à acheter une carte prépayée pour la consommation électrique. Ces consommations "Ankiba" sont très petites par rapport à la consommation finale, du coup nous les négligeons, car il n'y a aucun détail sur les communes dans lesquelles l'offre a été consommée. Ces données de consommation électrique par commune ont été présentées au niveau du Tableau 4.9. À partir des données du Tableau 4.9, nous avons calculé les variations de consommation électrique entre 2009 et 2007, 2010 et 2009 et enfin entre 2011 et 2010. Les résultats sont présentés sur le Tableau 4.23.

Tableau 4.23 : Variations des consommations électriques sur Mayotte de 2007 à 2011

Commune	Variation 2009-2007	Variation 2010-2009	Variation 2011-2010
ACOUA	14,28%	16,56%	0,22%
BANDRABOUA	28,05%	25,63%	-2,27%
BANDRELE	34,76%	17,33%	-4,81%
BOUENI	38,32%	4,58%	2,70%
CHICONI	29,47%	4,43%	9,55%
CHIRONGUI	29,98%	4,57%	1,50%
DEMBENI	49,31%	6,63%	-2,21%
DZAOUDZI	8,22%	2,26%	13,74%
KANI-KELI	30,19%	11,88%	-1,24%
KOUNGOU	39,61%	18,82%	15,90%
MAMOUDZOU	24,83%	4,67%	-4,01%
M'TSAMBORO	16,97%	18,07%	0,68%
M'TSANGAMOUI	13,88%	19,47%	1,32%
OUANGANI	41,90%	16,44%	-25,68%
PAMANDZI	18,67%	2,54%	-4,50%
SADA	42,13%	6,25%	-0,62%
TSINGONI	17,01%	8,59%	0,69%

Source : BEM

Nous observons que les communes qui détiennent les variations de consommation électrique les plus élevées se trouvent en majorité sur le Nord de l'île. Nous parlons de variation élevée lorsque celle-ci se compose de deux chiffres. C'est le cas notamment des communes d'Acoua, Bandraboua, Koungou, M'tsamboro et M'tsangamouji, ce qui représente cinq communes sur huit communes dont la variation est élevée. Il est difficile d'apporter une observation objective, néanmoins, nous pouvons déduire que les communes du Nord sont beaucoup plus dynamiques du point de vue énergétique que les restes des communes de l'île et qu'il se développe à un rythme plus élevé par rapport aux autres secteurs de l'île[102]. Ce phénomène peut s'expliquer en partie par la présence du port de Mayotte au Nord et le développement d'activité sur sa périphérie.

Au niveau du site de l'INSEE, nous avons obtenu des données sur le PIB de Mayotte de 2000 à 2014[103], sur la population (pour les années 1997, 2002, 2007 et 2012)[104], et sur le PIB par habitant de 2000 à 2014[103]. Nous présentons dans le Tableau 4.24 ci-dessous ces données, les données en italiques sont estimées à partir des taux de variation annuel moyen selon la période de recensement obtenues sur le site de l'INSEE.

Tableau 4.24 : Données socio-économiques du département mahorais de 2000 à 2014

Année	Population	PIB de Mayotte (€)	PIB par habitant (€)
2000	148 144	579 000 000,00	3 928,00
2001	154 218	626 000 000,00	4 077,00
2002	160 265	663 000 000,00	4 155,00
2003	165 233	751 000 000,00	4 554,00
2004	170 355	854 000 000,00	5 026,00
2005	175 636	957 000 000,00	5 464,00
2006	181 081	1 103 000 000,00	6 112,00
2007	186 452	1 188 000 000,00	6 390,00
2008	191 486	1 388 000 000,00	7 266,00
2009	196 656	1 383 000 000,00	7 058,00
2010	201 966	1 489 000 000,00	7 403,00
2011	207 419	1 556 000 000,00	7 534,00
2012	212 645	1 796 000 000,00	8 365,00
2013	220 726	1 770 000 000,00	8 034,00
2014	229 113	1 936 300 000,00	8 603,00

Source : INSEE[105] [106]

Étant donné que les données sur le nombre de population n'étaient disponibles que sur les années 1997, 2002, 2007 et 2012, nous avons donc estimé la population sur les autres années entre 2000 et 2014. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les données de l'INSEE sur quoi nous avons appliqué un taux de variation correspondant à la période dont nous souhaitons estimer la population. Par exemple, pour estimer la population de 2000, nous avons pris la population de 1997 qui était de 131 320 et nous l'avons multiplié par 4,1% trois fois. Ce chiffre de 4,1% correspond au taux de variation annuel moyen entre 1997 et 2002 comme indiqué sur le tableau ci-dessous trouvé sur le site de l'INSEE.

Tableau 4.25 : Croissance de la population à Mayotte entre 1997 et 2017

Année de recensement	Population (habitants)	Taux de variation annuel moyen depuis le recensement précédent (%)
1997	131 320	-
2002	160 265	4,1
2007	186 452	3,1
2012	212 645	2,7
2017	256 518	3,8

Source : INSEE

Nous remarquons juste qu'entre 2000 et 2014, le PIB de Mayotte, la population et le PIB par habitant ont respectivement évolué de 234%, de 74% et de 119%.

Avant de passer à l'analyse des données sur une année spécifique pour mesurer la relation entre différents paramètres qu'on présentera, on va donner quelques rapports et indices calculés à partir du Tableau 4.12, Tableau 4.13, Tableau 4.14, Tableau 4.15, Tableau 4.17, et Tableau 4.18 entre la France métropolitaine et les départements de Guyane, Mayotte et Réunion.

Tableau 4.26 : Consommation annuelle d'énergie par tonne de fuel importé (kWh/tep)

	Guyane	Mayotte	Métropole	Réunion
2011	3284,7	2578,7	2741,3	193,8
2014	4703,9	3073,8	2774,1	221,9
Variation 2014-2011	43,21%	19,20%	1,20%	14,50%

Le Tableau 4.26 montre que l'écart entre la consommation d'énergie et les importations de fuel est beaucoup plus grand dans les DOM qu'en France métropolitaine. Cette situation traduit une dépendance des DOM aux importations d'énergie pour leur production électrique.

Tableau 4.27 : Consommation annuelle d'énergie par PIB (kWh/PIB par habitant)

	Guyane	Mayotte	Métropole	Réunion
2011	55790	31433	13681919	132182
2014	54817	31815	11265771	125308

Entre 2011 et 2014, nous constatons que le ratio de la consommation annuelle d'énergie par PIB diminue pour la Guyane, la France et La Réunion tandis qu'il augmente pour Mayotte. Cela traduit que Mayotte est toujours dans une phase de développement de son territoire qui nécessite encore beaucoup d'énergie.

Maintenant, nous allons présenter des indices de consommation électrique par secteur d'activité sur les quatre territoires traités en prenant comme année de base l'année 2011. Au niveau de l'INSEE, leur année de référence est 1998, mais faute de donnée sur cette année, on s'en tient aux données du Tableau 4.28.

Tableau 4.28 : Indice de la consommation électrique du secteur résidentiel

		Guyane	Mayotte	Métropole	Réunion
2011	Résidentiel	1	1	1	1
2014	Résidentiel	1,06	1,19	0,98	1,06
Variation 2014-2011		5%	18%	-2%	6%

Entre 2011 et 2014, l'indice de la consommation électrique du secteur résidentiel le plus élevé se trouve à Mayotte. Ce qui traduit une évolution de la consommation électrique chez les ménages mahorais en terme notamment d'équipement électronique afin de rattraper ceux des autres départements d'Outre-mer et surtout de la France continental.

Tableau 4.29 : Indice de la consommation électrique du secteur industriel

		Guyane	Mayotte	Métropole	Réunion
2011	Industriel	1	1	1	1
2014	Industriel	1,87	0,73	0,98	1,37
Variation 2014-2011		87%	-27%	-2%	36%

L'indice de consommation électrique du secteur industriel sur Mayotte traduit un faible taux d'industrialisation et même une diminution des activités de cette dernière entre 2011 et 2014 en supposant que l'activité industrielle est liée à sa consommation énergétique.

Tableau 4.30 : Indice de la consommation électrique du secteur tertiaire

		Guyane	Mayotte	Métropole	Réunion
2011	Tertiaire	1	1	1	1
2014	Tertiaire	0,98	2,11	1,02	0,94
Variation 2014-2011		-2%	111%	1%	-6%

Le secteur tertiaire de Mayotte possède l'indice de consommation électrique le plus élevé entre 2011 et 2014, ce qui traduit une forte activité et par voie de conséquence le développement de ce secteur sur Mayotte.

Au niveau de l'INSEE, nous avons obtenu une base de données sur l'année 2012 comprenant différents types de données. Nous avons décidé d'étudier en profondeur cette base de données afin de ressortir les éléments les plus influents sur la consommation électrique de Mayotte par rapport aux différents éléments trouvés.

Tableau 4.31 : Principales caractéristiques socio-économico-énergétique des communes à Mayotte en 2012

Communes	Localisation	Superficie km ²	Consommation (MWh)	Population	Taux d'emploi en % des 15-65 ans	Taux de chomage en % des 15-65 ans	Taux d'activité en % des 15-65 ans	Part des diplômés en %	Nombre de logement	Part de logement en tôle en %	Part de logement en dur en %	Part des résidences principales en %	Résidence Principale (RP)							
													Taux d'électrifi- cation en %	Part de résidence avec de l'eau potable à l'intérieur	Part de résidence avec cuisine intérieur	Part de résidence avec un réfrigérateur	Part de résidence avec télévision	Part de résidence avec ordinateur	Part de résidence avec une douche ou baignoire intérieur	Part de résidence avec voiture
ACOUA	Nord-Ouest	13	2 756	4 915	32,2	38,6	52,4	33,3	824	17	81	72	96	71	33	64	77	31	34	27
BANDRABOUA	Nord-Est	32	7 674	10 305	28	43,8	49,7	30,8	614	23	75	74	94	69	36	64	76	29	38	28
BANDRELE	Sud-Est	36	6 515	8 044	23,6	34,5	38,3	25,9	417	23	74	76	93	81	37	62	79	28	35	24
BOUENI	Sud-Ouest	14	4 977	6 583	25,5	30,7	38,4	26,7	277	24	70	73	93	72	37	69	79	28	40	25
CHICONI	Centre-Ouest	8	4 563	7 305	23,3	40,9	39,6	23	1 116	38	57	79	90	63	29	69	75	22	38	21
CHIRONGUI	Ouest	28	6 815	8 295	17,5	43,6	31	19,8	401	47	50	84	80	69	21	60	67	21	29	15
DEMBENI	Centre-Est	39	7 308	11 071	26,1	40,4	42,5	27,3	571	38	60	84	85	76	34	67	71	31	42	25
DZAOUDZI	Est	7	20 640	14 685	24,1	41,7	39,4	25,2	1 798	49	49	83	80	52	31	59	65	25	36	24
KANI-KELI	Sud	21	3 984	5 196	17,3	35,9	26,6	17,7	268	52	46	83	77	44	19	47	61	14	25	14
KOUNGOU	Nord-Est	28	29 060	26 715	35,4	20,7	44,4	26,5	1 119	32	65	86	86	57	32	54	70	23	36	22
MAMOUDZOU	Nord-Est	42	100 936	58 197	34,9	29,3	47,5	33,5	2 061	31	68	84	87	46	30	53	70	24	28	25
M'TZAMBORO	Nord	14	4 436	8 078	19,3	48,6	38,4	33,1	788	35	60	85	93	42	14	60	73	18	14	17
M'TSANGAMOUI	Nord-Ouest	22	3 626	6 472	28,5	40,3	46,5	41	609	24	70	85	96	68	32	72	79	28	36	27
OUANGANI	Centre	19	5 393	9 937	36,1	32,2	53,6	48,2	593	7	86	81	98	93	51	80	83	35	56	37
PAMANDZI	Est	4	18 440	10 201	32,1	43,5	56,7	38,7	2 670	13	80	79	98	79	40	72	84	26	45	35
SADA	Centre-Ouest	12	7 539	10 484	32,3	36,3	51,4	31,7	1 345	20	64	79	97	77	39	64	87	24	43	41
TSINGONI	Centre-Ouest	35	11 140	10 618	33,7	32,9	50,6	34,8	775	21	66	80	97	84	46	69	82	30	51	42

Source : INSEE

Le Tableau 4.31 donne des informations au niveau de différentes caractéristiques du département de Mayotte sur l'année 2012. Nous nous intéressons à la relation qui existe entre les différentes données obtenues sur les différentes communes de Mayotte ainsi que leurs influences respectives. Nous donnons également au début du tableau, une variable qualitative de localisation de chaque commune sur le territoire de Mayotte.

Nous souhaitons ici à l'aide du logiciel R appréhender la relation de nos différentes données d'une commune à une autre de façon multidimensionnelle. Pour cela, nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP) avec R. D'après Husson et al.[107], l'ACP s'applique à des tableaux croisant des individus (représentés ici par les communes de Mayotte en ligne) et des variables quantitatives. L'objectif de l'ACP est d'analyser les données à travers ses lignes (les communes) ou à travers ses colonnes (les variables). Nous écrivons x_{ik} la valeur prise par l'individu i pour la variable k ; i varie de 1 à I et k de 1 à K . Nous appelons \bar{x}_k la moyenne de la variable k calculée sur l'ensemble des I individus :

Équation 7 : Calcul de la moyenne de la variable k

$$\bar{x}_k = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I x_{ik},$$

et s_k l'écart-type de la variable k :

Équation 8 : Écart-type de la variable k

$$s_k = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}$$

Nous venons de voir qu'un individu correspond à une ligne du tableau, c'est-à-dire à un ensemble de K valeurs numériques. Les individus évoluent donc dans un espace \mathbb{R}^K appelé "espace des individus". Si nous dotons cet espace de la distance euclidienne usuelle, la distance entre deux individus i et l s'écrit:

Équation 9 : Distance euclidienne entre deux individus

$$d(i, l) = \sqrt{\sum_{k=1}^K (x_{ik} - x_{lk})^2}$$

Avec cette formule, nous apprenons que si deux individus ont des valeurs proches dans le tableau sur l'ensemble des K variables, alors ils sont proches dans l'espace \mathbb{R}^K .

Nous avons vu qu'une variable est une colonne du tableau, c'est-à-dire un ensemble de I valeurs numériques, assimilable à un vecteur de dimension I évoluant dans un espace vectoriel à I dimensions noté \mathbb{R}^I . Dans ce cas, le produit scalaire entre deux variables k et l s'écrit :

Équation 10 : Produit scalaire entre deux variables k et l

$$\sum_{i=1}^I x_{ik} * x_{il} = \|k\| * \|l\| * \cos(\theta_{kl})$$

Plus une variable est mieux représentée sur un axe, et plus elle est proche du bord du cercle des corrélations et de l'axe respectif et inversement. [31]

Afin de réaliser l'ACP sur le logiciel R, on s'est basé sur un package de R appelé **FactoMineR**. Ce package est dédié à l'analyse exploratoire multidimensionnelle de données. Nous avons obtenu les résultats suivants :

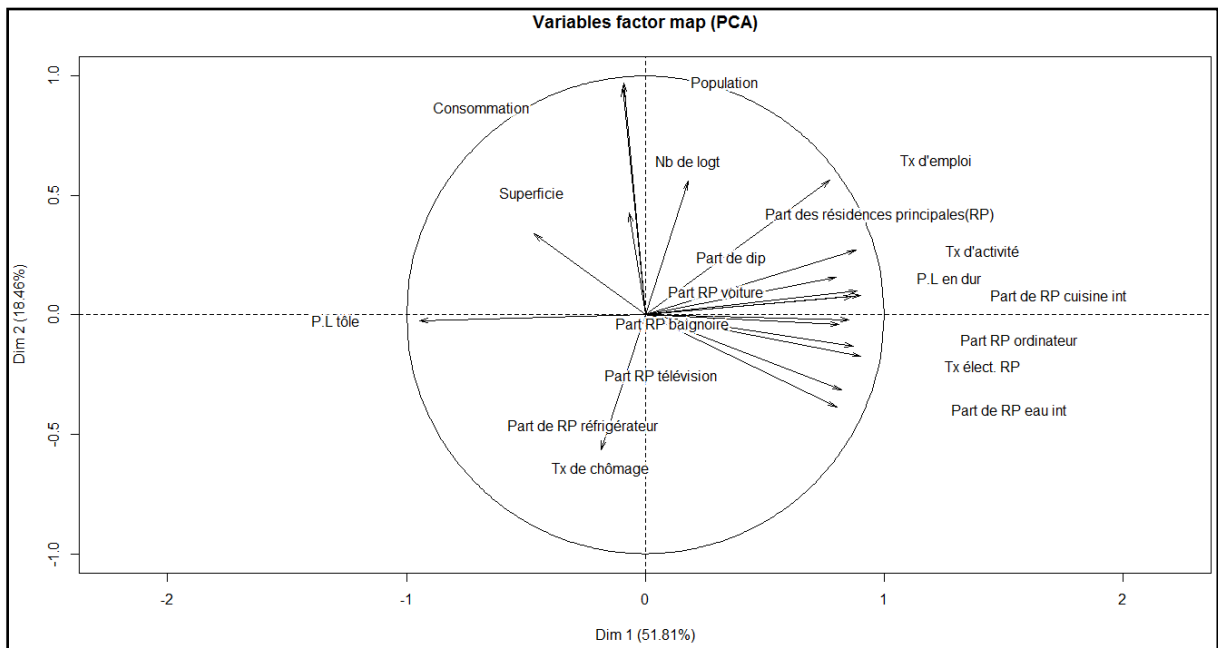


Figure 4.6 : Résultats de l'ACP effectué au niveau du Tableau 4.31: Graphe des variables

Nous observons sur cette Figure 4.6 que les variables présentent des coordonnées de signe différentes, c'est-à-dire qu'il existe des corrélations positives et négatives.

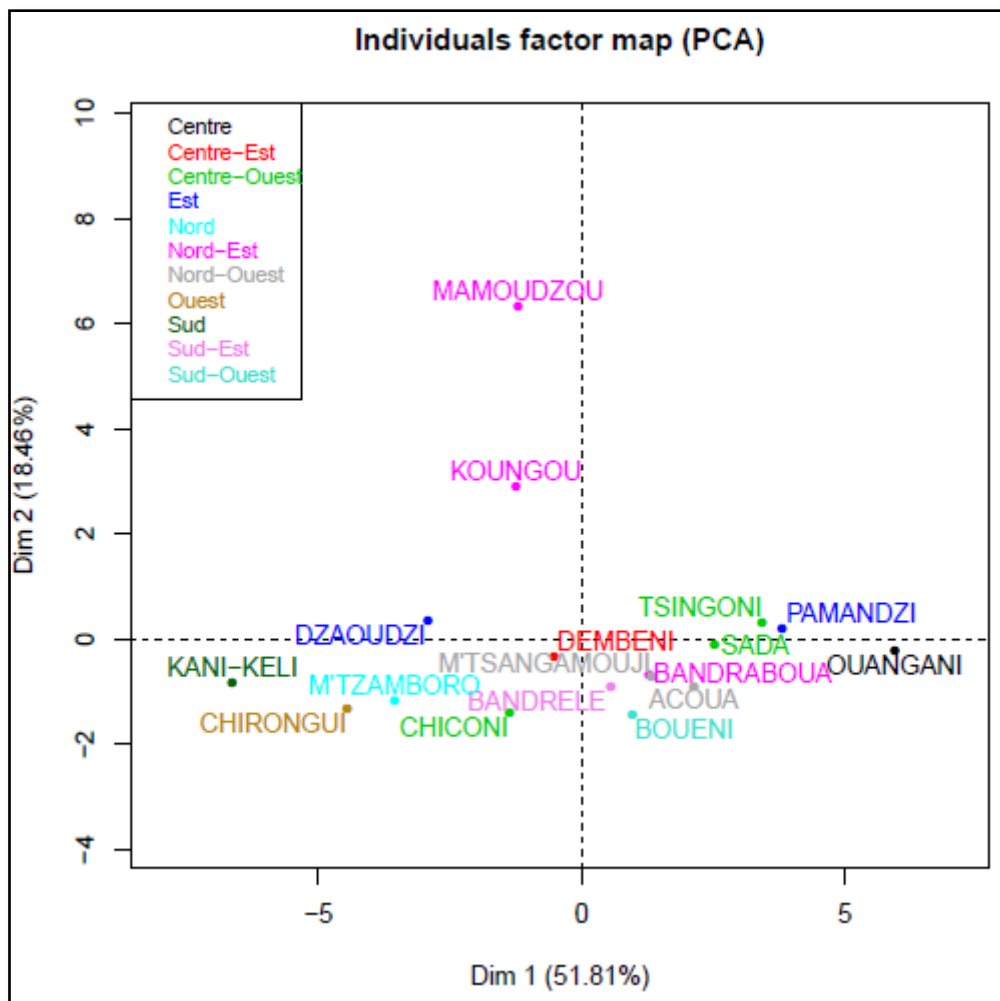


Figure 4.7 : Résultats de l'ACP effectué au niveau du Tableau 4.31 : Graphe des individus

D'après les Figure 4.6 et Figure 4.7, nous observons que le premier facteur (Dim 1) est prépondérant, car il exprime à lui seul 51,81% de l'inertie totale. Le second facteur est relativement essentiel, car il exprime 18,46% de l'inertie totale. Ces deux facteurs expriment ($51,81 + 18,46 = 70,27$) 70,27% de l'inertie totale, ce qui justifie de s'y limiter, c'est-à-dire que nous pouvons nous contenter de ces deux dimensions.

Nous observons également sur cette Figure 4.7, qu'il y a deux communes qui se détachent des autres communes, ce sont les communes de Mamoudzou et de Koungou. Ces deux communes se détachent des autres communes car ce sont deux communes où il existe une forte activité économique en plus d'être fortement peuplé. En effet, Koungou est la commune où se trouve le port de l'île et Mamoudzou est la capitale de Mayotte. Nous avons aussi les communes de Sada, Tsingoni et Pamandzi qui forment un groupe, ce sont des communes qui occupent une place non négligeable au niveau du territoire. Effectivement, à Pamandzi, nous trouvons le seul aéroport se trouvant sur l'île; à Tsingoni, nous avons énormément de bâtiments administratifs comparativement aux autres communes non cités ici en plus d'avoir le régiment de BSMA (Bataillon de Service Militaire Adapté) qui y est localisé. Et enfin à Sada, nous trouvons aussi beaucoup de bâtiments administratifs tels qu'un lycée, un collège, une gendarmerie... Tous ces facteurs expliquent que ces communes possèdent des similitudes dans leurs manières de fonctionner.

Le bilan des liaisons entre les variables, du Tableau 4.31, met en évidence des corrélations positives et négatives entre différentes variables. Il existe aussi des variables qui ne sont pas bien représentées sur la Figure 4.6, par exemple la superficie, le nombre de logements, le taux de chômage, la part des résidences principales et la part des diplômés. Nous notons que les variables consommation électrique et nombre de population sont très corrélés, ce résultat est en adéquation avec un article de Bénard-Sora et al. réalisé sur l'île de La Réunion au niveau de la consommation électrique[108]. Nous remarquons notamment que les variables "Part de logement en tôle", "Part de logement en dur", "Part de résidence avec cuisine intérieur", "Part de résidence avec voiture", "Part de résidence avec ordinateur" et "Part de résidence avec baignoire" sont liées plus étroitement que les autres.

La Figure 4.7 permet de visualiser les communes qui présentent des similitudes entre elles selon les différentes variables énumérées au niveau du Tableau 4.31; c'est-à-dire qu'elle permet de visualiser le positionnement d'une commune de Mayotte par rapport aux variables étudiées. Nous observons qu'il y a deux communes sur Mayotte qui se détachent par rapport aux autres communes. En effet, les communes de Mamoudzou et de Koungou sont proches l'une de l'autre par rapport aux variables étudiées. Nous pouvons aussi constater que les communes de Sada, Tsingoni et Pamandzi présentent des similitudes par rapport aux variables étudiées. Il en est de même pour les communes de M'tsangamouji, Bandraboua, Acoua, Bandrélé et Bouéni.

4. 2 - SIMULATIONS DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE ET PRODUCTION ÉLECTRIQUE à PARTIR D'EnR (100 m² de capteur photovoltaïque) SUR MAYOTTE. MISE EN OEUVRE DES FICHIERS HORAIRES ASSOCIÉS.

4.2. 1 - Évaluation de la consommation électrique

4.2.1. 1 - Analyse de la consommation pour les îles références

Nous avons vu dans les sections précédentes que sur le département de Mayotte, l'obtention des données au niveau de la consommation électrique n'a malheureusement pas été possible. Dès lors, il fallait trouver une solution afin de pouvoir calculer, ou du moins évaluer, cette consommation électrique. Pour réaliser cette tâche, nous nous sommes appuyés sur des données EDF au niveau de la production électrique heure par heure que nous avons pu récupérer en ligne[109] au niveau de quatre départements d'Outre-mer. Une analyse va être menée afin de nous permettre de nous caler sur la production horaire du département de La Réunion pour ressortir les données de consommation horaire sur le département de Mayotte. Puisqu'une production électrique doit nécessairement répondre à une demande électrique, au niveau de la variation, nous aurons la même tendance comme montrer sur la Figure 4.5; nous avons ensuite mis en place une méthodologie avec laquelle nous avons évalué la consommation heure par heure sur le département de Mayotte à partir des données de production horaire récupérées chez EDF Réunion en appliquant notamment des coefficients de perte et de variation selon les besoins de l'étude.

Nous avons pu obtenir des données sur la consommation électrique heure par heure sur une année complète au niveau du département de La Réunion. Pour rappel, nous avons choisi le département de La Réunion comme département de base pour estimer les données de consommation horaire sur le département de Mayotte en nous basant sur deux critères principaux et un critère secondaire qui sont: le positionnement géographique du département par rapport au département de Mayotte; et la similitude de la tendance de la courbe de charge entre La Réunion et Mayotte. Le critère secondaire c'est le fait d'avoir des données sur les mois et année pour comparer les courbes de consommation.

Tableau 4.32 : Présence de données sur la consommation électrique annuelle par mois de 2009 à 2016

	Guadeloupe	Guyane	Martinique	Mayotte	Réunion
2009				×	×
2010				×	×
2011				×	×
2012	×	×	×		×
2013	×	×	×		×
2014	×	×	×		×
2015	×	×	×		×
2016	×	×	×		×

Source: BEGua, BEG, BEMar, BEM, BER

En observant le Tableau 4.32, nous remarquons qu'il y a un seul département d'Outre-mer, pour lequel, il existe des données au niveau de la consommation électrique annuelle par mois. Nous avons des données sur trois années (2009, 2010 et 2011) pour Mayotte et l'autre département se trouve être le département de l'île de La Réunion.

4.2.1.1. 1 - Analyse sur les courbes journalières

Dans cette section, nous allons faire l'analyse des courbes de charge journalière afin de visualiser l'évolution de ces courbes selon les différents jours de la semaine. L'analyse est effectuée sur chaque jour de la semaine heure par heure. En effet, nous souhaitons analyser la variation de la courbe de charge heure par heure pour chaque jour de la semaine. Nous pourrions notamment avoir une idée sur la variation de la courbe de charge journalière, en fonction des données que nous avons obtenues, des départements de Mayotte et de La Réunion. Nous savons notamment que la consommation électrique réunionnaise est plus élevée que celui de Mayotte.

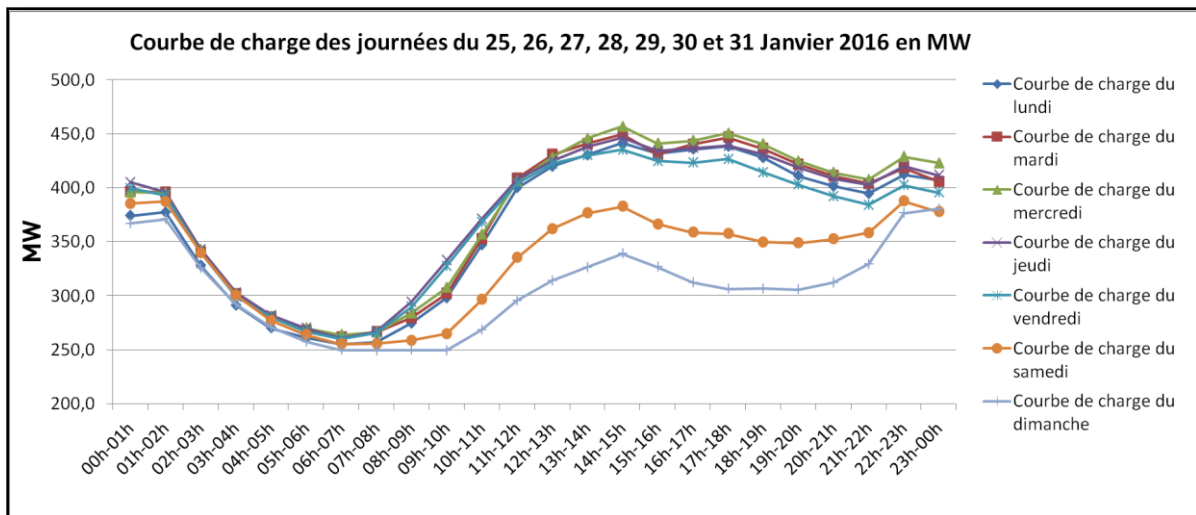


Figure 4.8 : Courbe de charge journalière sur une semaine à La Réunion en MW

Nous constatons que les courbes de charge journalière possèdent les mêmes formes de variation pour l'ensemble des jours de la semaine. Cependant, pour le samedi et le dimanche, au cours de la journée, cette variation se détache des autres jours, elle se situe en-dessous des autres. Ce phénomène s'observe aussi pour le vendredi, mais il est moins visible que pour samedi et dimanche. En effet, du lundi au vendredi, la variation des courbes de charge pour chaque jour est la même et les courbes sont très proches les unes des autres entre 01h et 14h. Elles présentent un très léger décalage entre 14h et 01h, mais présentent les mêmes fluctuations avec ce léger décalage pour vendredi de 14h à 00h. Les courbes de charge des jours du lundi au vendredi sont appelées courbes de charge des jours ouvrés. Pour la journée de samedi et dimanche, leurs courbes de charge entre 00h et 07h présentent les mêmes caractéristiques que pour l'ensemble des autres jours de la semaine. Après 07h, leurs courbes de charges respectives se détachent des autres courbes, et nous remarquons que la variation des courbes de charges entre 07h et 00h sont plus proches que ceux des autres jours, tout en gardant dans l'ensemble la même variation. Nous observons que la courbe de charge du samedi se détache des autres courbes à partir de 07h: elle se situe entre la courbe du dimanche et les autres courbes de la semaine. La courbe de charge pour un jour comme le samedi est appelée courbe de charge de jour semi-ouvré. Pour la courbe de charge du dimanche, nous observons qu'à partir de 07h, elle se détache complètement de l'ensemble des autres courbes pour se situer en dessous de toutes les autres. Elle a l'appel de puissance la moins élevée de tous les autres jours de la semaine. La courbe de charge pour un jour comme le dimanche est appelée courbe de charge de jour fermé ou férié.

Si nous comparons ces courbes de charge avec des courbes de charge du département de Mayotte obtenues dans un document officiel traitant des stratégies de transition énergétique[110] au niveau insulaire, nous nous rendons compte que les tendances sont presque les mêmes. La différence est surtout due à une question d'amplitude au niveau de la présentation. La Figure 4.9 illustre les tendances des courbes de charge.

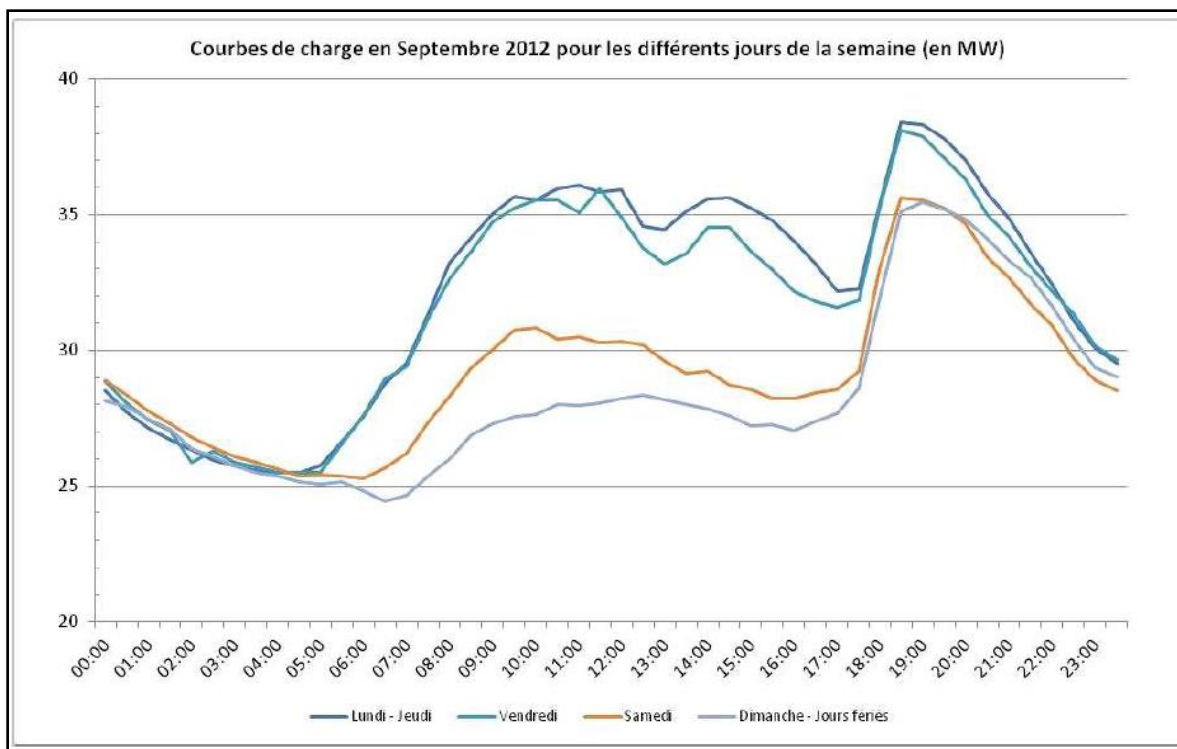


Figure 4.9 : Courbes de charge en septembre 2012 pour les différents jours de la semaine à Mayotte [MW][92]

Nous remarquons que comme pour la Figure 4.8, les variations des courbes de charge entre lundi et vendredi sont presque pareilles avec un léger décalage pour vendredi par rapport aux autres jours de la semaine. Ensuite, nous constatons que samedi et dimanche ont chacun une variation différente, surtout au cours de la journée.

4.2.1.1. 2 - Analyse sur les courbes hebdomadaires

Dans cette section, nous allons faire l'analyse des courbes de charge hebdomadaire afin de visualiser la nature de variation de l'appel de puissance pendant une semaine. La simulation des courbes de charge est effectuée pour un mois complet sur quatre semaines, soit le mois de Janvier. Pour chaque semaine, nous prenons les valeurs du lundi au dimanche sur chaque tranche horaire et nous calculons la moyenne. Les résultats obtenus sont visibles ci-dessous sur la Figure 4.10.

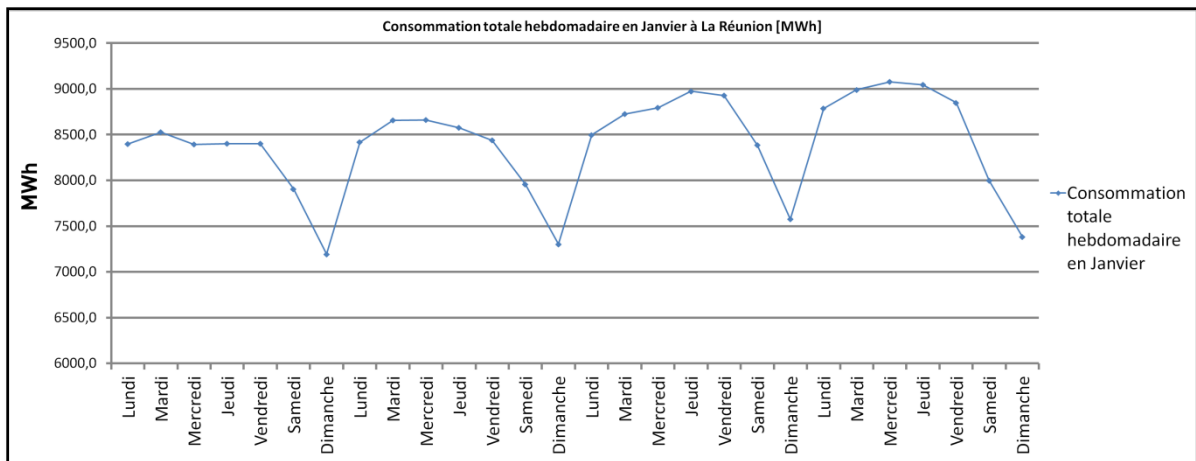


Figure 4.10 : Courbes de charge hebdomadaire sur les semaines en Janvier à La Réunion [MWh]

Nous observons sur la Figure 4.10 que la variation des courbes de charge pour chaque semaine est la même. En effet, nous remarquons une forte décroissance de l'ensemble des courbes de charge entre 21h et 05h, qui peut s'expliquer par le fait que le soir, la majorité des agents consommateurs d'électricité dorment et la demande électrique baisse considérablement jusqu'à l'aube.

Ensuite, il y a une forte croissance des courbes de charge enregistrées entre 05h et 13h. À partir de 05h, nous avons une majorité des agents consommateurs qui se réveillent progressivement et influencent donc sur la demande électrique. À partir de 08h, cette demande augmente encore plus fortement, car c'est généralement l'heure du début du travail que ce soit à la maison ou au bureau ou le lieu de travail où les agents consommateurs sont très demandeurs d'électricité.

Puis, nous notons une légère décroissance de la courbe de charge entre 13h et 19h qui peut s'expliquer par le fait que certains agents consommateurs ne travaillent que le matin et que parmi ceux qui travaillent l'après-midi, le travail se fait souvent jusqu'à 16h, et parfois au ralenti du fait de la fatigue accumulée pendant la matinée.

Enfin nous enregistrons une légère hausse des courbes de charge entre 19h et 21h, avec même un pic vers 21h, qui peut s'expliquer par le fait qu'à partir de 18h-19h, la majorité des ménages sont chez eux entrain de s'occupés par la préparation du dîner. Cela engendre une demande électrique conséquente qui peut-être expliqué par le fait qu'actuellement, il existe beaucoup de plaques de cuisson électriques et de cuiseurs électriques sans oublier la panoplie des composants électriques en cuisine. Au-delà, de la cuisine, il se trouve que c'est le soir que les ménages regardent le plus la télévision avec l'ensemble des gammes électriques associées à la télé qui impactent aussi fortement sur la demande électrique pendant cette période, c'est peut-être une des raisons de la présence du pic à cette période.

4.2.1.1. 3 - Analyse sur les courbes mensuelles

Dans cette section, l'analyse des courbes mensuelles permet de visualiser les fluctuations qui ont lieu sur chaque mois au cours de l'année pour notamment visualiser les variations en fonction des mois. La simulation des courbes de charge mensuelle se fait en prenant la moyenne

sur chaque plage horaire de chaque jour sur un mois. Les résultats obtenus sont visibles sur la Figure 4.11 ci-dessous.

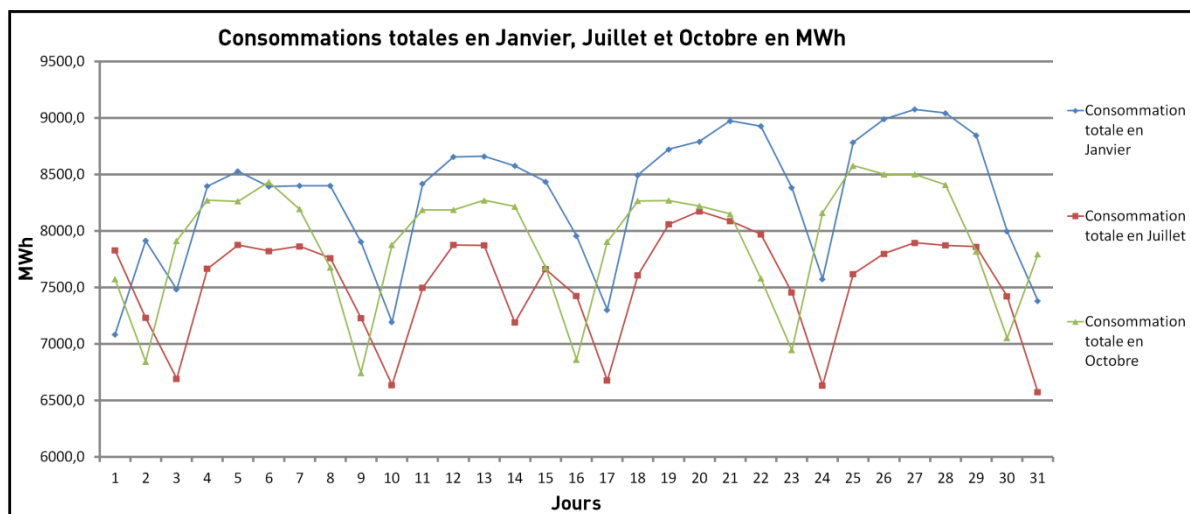


Figure 4.11 : Consommations totales mensuelles en Janvier, Juillet et Octobre à La Réunion [MWh]

Au niveau de cette Figure 4.11, nous observons que l'ensemble des courbes de charge présentent les mêmes variations mensuelles et qu'il existe une amplitude en fonction des mois plus ou moins marquée. Dans l'ensemble, nous observons une phase de croissance et 5 jours après, nous avons une phase de décroissance qui apparaît. Ces variations au niveau mensuel s'expliquent par le fait que dans le mois il peut y avoir quatre semaines et le taux d'activité (économique, sur la consommation électrique) du territoire varie sensiblement pendant la semaine. En effet, en début et milieu de semaine, le taux d'activité est soutenu pour s'atténuer vers la fin de la semaine. Les pics élevés correspondent à des jours en milieu de semaine et les pics bas correspondent aux week-ends, en particulier le dimanche.

4.2.1.1. 4 - Analyse sur les courbes annuelles

Dans cette section, l'analyse de la courbe annuelle permet de visualiser les fluctuations qui ont lieu sur chaque mois au cours de l'année pour notamment visualiser les variations qui surviennent en fonction des saisons. La simulation de la courbe de charge annuelle se fait en prenant la totalité de chaque mois dans une année complète. Les résultats obtenus sont visibles sur la Figure 4.12 ci-dessous.

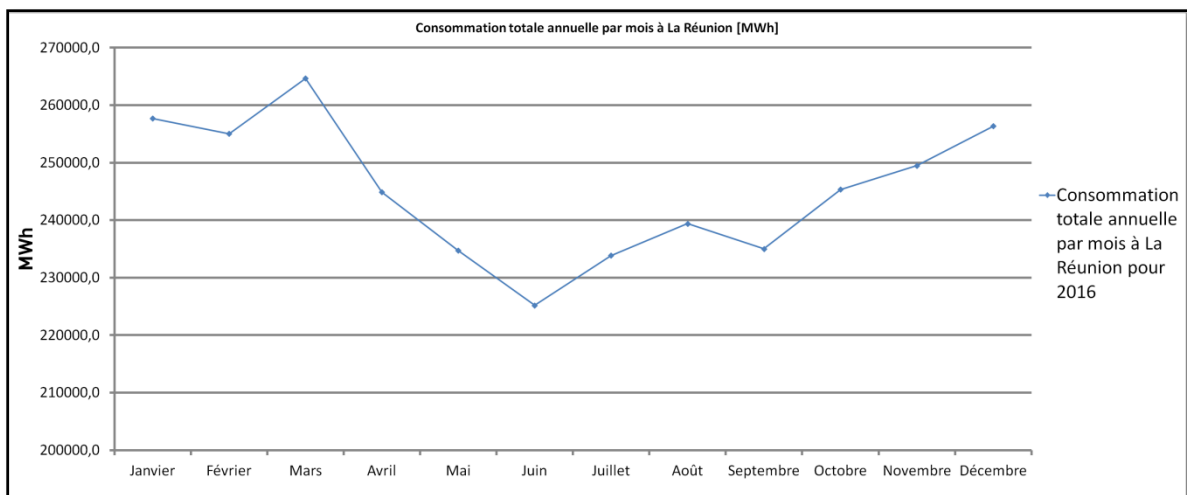


Figure 4.12 : Courbe de charge annuelle à La Réunion [MWh]

Sur cette Figure 4.12, nous remarquons que la courbe de charge annuelle fluctue sur l'année avec des phases de décroissance et de croissance au niveau de la consommation électrique. Les mois d'été austral présentent les consommations électriques les plus élevées par rapport aux autres mois intermédiaires et d'hiver austral. Le pic de consommation électrique la plus élevée est observé pour le mois de Mars, et le pic de consommation électrique la moins élevée est observé pour le mois de Juin. L'écart entre la consommation la plus élevée et la moins élevée se situe environ à 40 000 MWh.

4.2.1. 2 - Structuration du fichier de consommation de Mayotte

L'évaluation de la consommation électrique du département de Mayotte est un processus qui permettra à l'aide des données d'un territoire limitrophe, sous l'influence des mêmes conditions climatiques et possédant les mêmes caractéristiques de variation sur les courbes de charge, de pouvoir se baser dessus pour évaluer les données de l'autre territoire. Nous avons vu que nous avons des données de consommation horaire sur une année complète pour le département de La Réunion. Dès lors, afin d'évaluer les données sur Mayotte, nous allons naturellement nous appuyer sur les données du territoire réunionnais, et à l'aide d'une méthode que nous allons voir par la suite dans ce document, effectuer l'évaluation des données de consommation électrique horaire du territoire mahorais.

4.2.1.2. 1 - Échelle journalière

L'évaluation des données de consommation électrique horaire de Mayotte sera effectuée dans le but de pouvoir visualiser la courbe de charge journalière heure par heure sur une journée quelconque dans l'année. Ce fichier permettra notamment de visualiser la variation de la courbe de charge selon le jour. En effet, nous avons vu précédemment que la courbe de charge varie en fonction du jour de la semaine. Pendant les jours ouvrés, la consommation est plus élevée que

pendant les jours semi-ouverts, dont la consommation est elle-même plus élevée que celle pendant les jours fermés. Les courbes de charge journalière, que nous allons évaluer à l'aide des méthodes que nous allons vous présenter en se basant sur les données du territoire réunionnais, devront avoir les mêmes allures que celles de La Réunion, que ce soit au niveau de la fluctuation horaire ou journalière, vu que ces deux territoires partagent plusieurs caractéristiques communes. Pour évaluer ces données de consommation horaire dans l'année, nous allons nous baser en premier lieu sur des données de consommation sur des journées heure par heure que nous avons pu obtenir au niveau du document PPE de Mayotte. Ces données seront présentées dans une autre section avec les détails nécessaires.

4.2.1.2. 2 - Échelle hebdomadaire

À l'échelle hebdomadaire, l'évaluation de la courbe de charge se fera sur des semaines complètes pour un mois complet. Sur un mois, il existe environ quatre semaines. D'où la nécessité de présenter des courbes de charge hebdomadaire sur quatre semaines afin de pouvoir visualiser la fluctuation de ces courbes, pour pouvoir détecter d'éventuels pics de consommation durant la semaine. Nous avons vu, sur le cas du territoire réunionnais, que durant la semaine la consommation totale hebdomadaire fluctue passant d'un minimum d'environ 7250 MWh à un maximum d'environ 9100 MWh, ce qui représente un écart d'environ 1850 MWh entre les deux extremums. Sur les quatre semaines simulées, nous notons que la variation de la courbe de charge sur les quatre semaines est sensiblement le même. Pour Mayotte, nous attendons à ce que les courbes de charge au niveau hebdomadaire présentent les mêmes types de variation que celles du territoire réunionnais.

4.2.1.2. 3 - Échelle mensuelle

À l'échelle mensuelle, l'évaluation de la courbe de charge permettra de visualiser sa variation au cours des mois. En se basant sur les données de consommation du territoire réunionnais, nous allons évaluer les données de consommation sur Mayotte. Cette évaluation va se faire en utilisant un rapport qui a été calculé entre la consommation sur une journée type à La Réunion et la consommation sur une journée type des consommations les plus élevées en été sur Mayotte. Nous n'avons pas trouvé une consommation sur une journée type pour Mayotte sur toute l'année. C'est pour cela que le rapport concerne la consommation au niveau de la journée type sur La Réunion et la consommation sur la journée type d'été à Mayotte.

4.2.1.2. 4 - Échelle annuelle

À l'échelle annuelle, l'évaluation de la courbe de charge permettra de voir la variation dans l'année. En effet, pour chaque mois, nous présenterons la consommation totale électrique sur le territoire de Mayotte.

4.2.1. 3 - Critères de sélection pour la simulation de la consommation horaire électrique de Mayotte

4.2.1.3. 1 - Structure du fichier

La simulation de la consommation horaire pour le territoire mahorais se fait en se basant sur les données de production horaire électrique du territoire réunionnais. En effet, sur Mayotte, l'obtention d'une base de données sur une consommation horaire annuelle n'a pas été possible. Dès lors, nous nous sommes orientés sur une base de données que nous avons pu obtenir avec EDF sur des données de 2016 pour La Réunion. Pour rappel, les données obtenues sur le territoire réunionnais concernent la production horaire. Étant donné que la production doit nécessairement répondre à une demande pour éviter de grandes pertes, nous avons fait l'hypothèse que cette production reflète la consommation électrique horaire. Ensuite à l'aide de ces données horaires, nous allons estimer la consommation horaire de Mayotte.

4.2.1.3.1. 1 - Simulation consommation mensuelle dans l'année

Pour évaluer la consommation électrique mensuelle du territoire mahorais, nous allons faire la somme des consommations horaires sur un mois complet.

4.2.1.3.1. 2 - Simulation consommation horaire

La simulation de la consommation électrique au niveau horaire sur Mayotte pose un gros problème, car il y a un manque flagrant de données au niveau de la consommation que ce soit au pas de temps mensuel ou horaire. Pour pouvoir évaluer la consommation électrique au niveau horaire du département de Mayotte, nous allons utiliser une méthodologie se basant sur les données de production horaire du département de La Réunion.

Il se trouve qu'au niveau du document PPE de Mayotte, il existe un graphique contenant les profils de production électrique horaire journalière enregistrée sur le jour où l'appel de puissance a été le plus élevée entre 2006 et 2014[87]. Nous avons repris ces courbes, et à l'aide d'un logiciel

appelé "Engauge Digitizer", nous avons extrait les données sous format graphique pour les avoir sous format de tableau que nous avons donné sur le Tableau 4.6. Pour le territoire réunionnais, nous avons obtenu des données sur un rapport de la CRE datant de 2015 où il y avait les données sur le profil de production électrique horaire journalière pour une journée type d'été et d'hiver[111]. Nous avons procédé comme pour Mayotte afin d'obtenir les données sous format tableau exploitable. Les données obtenues sous format tableau pour Mayotte et la Réunion ont été présentées sur le Tableau 4.6 et Tableau 4.19.

En se basant sur la Figure 4.5, nous observons que les tendances des courbes de charge pour Mayotte et La Réunion possèdent la même allure. Nous avons pu arriver à ce résultat en traçant la moyenne mobile des deux courbes, et leurs tendances se ressemblent fortement.

Au niveau de Mayotte, nous observons tout d'abord une phase de décroissance sur la consommation électrique entre 00h et 04h du matin. Ensuite, il y a une phase de croissance de la consommation électrique entre 04h et 11h, suivi d'une légère baisse jusqu'à 12h environ. Puis, nous remarquons une légère hausse vers 12h jusqu'à vers 15h, suivie d'une baisse jusqu'à 18h environ. Après, nous notons une hausse de la consommation électrique vers 18h jusqu'à 20h environ pour enfin régresser par la suite. Nous remarquons aussi sur cette courbe la présence d'un grand pic sur la consommation électrique journalière vers 20h et deux pics moyens vers 11h et 15h.

Au niveau de La Réunion, nous notons comme pour la courbe de Mayotte, une phase de décroissance de la consommation électrique de 00h jusqu'à 04h environ. Ensuite, il y a une phase de croissance jusqu'à 11h environ, suivie d'une baisse jusqu'à 14h environ. Puis, nous observons une légère phase de croissance jusqu'à 15h environ, suivie d'une légère baisse jusqu'à 17h environ. Après, nous remarquons une phase de hausse légère jusqu'à 19h environ, pour terminer avec une phase de décroissance.

Nous notons pour le cas de La Réunion, sur la Figure 4.5 la présence d'un grand pic sur la consommation électrique journalière vers 11h et deux pics moyens vers 15h et 19h. Nous faisons remarquer que la moyenne de la journée type pour La Réunion a été obtenue en faisant la moyenne des journées types de consommation sur l'hiver et l'été austral, tandis que pour Mayotte la moyenne est obtenue en prenant des données qui sont issues que de l'été austral. D'où peut-être les légères différences que nous pouvons remarquer sur les niveaux de pics de consommation et les oscillations plus marquées pour la courbe de charge journalière de La Réunion.

À La Réunion, les pics de consommation sont beaucoup plus accentués qu'à Mayotte. À Mayotte, la consommation est beaucoup plus régulière sur la journée. La différence de chute de production entre 13h et 15h peut s'expliquer par le comportement des consommateurs qui est différent à La Réunion et à Mayotte. Cependant, la moyenne de consommation ainsi que la tendance restent pratiquement similaires. Par voie de conséquence, nous pouvons donc nous appuyer sur des rapports de consommation horaire, entre La Réunion et Mayotte, pour retrouver les données de consommation horaire sur l'année de Mayotte à partir de celles de La Réunion.

Nous avons calculé un rapport de consommation électrique pour chaque heure de la journée entre La Réunion et Mayotte. Ce rapport est calculé par l'équation suivante :

Équation 11 : Calcul du rapport consommation horaire journalière

$$\text{Rapport consommation horaire} = \frac{\text{Données consommation horaire moyenne courbe de charge sur journée type annuel territoire témoin}}{\text{Données consommation horaire de la courbe de charge sur journée type été territoire d'étude}}$$

Nous obtenons le Tableau 4.33 ci-dessous.

Tableau 4.33 : Rapport des consommations électriques horaires calculées entre La Réunion et Mayotte

Heure	Rapport
00h	8,59
01h	8,74
02h	8,70
03h	8,80
04h	9,10
05h	9,71
06h	10,88
07h	11,96
08h	11,20
09h	11,11
10h	11,07
11h	11,15
12h	11,14
13h	10,92
14h	8,95
15h	10,45
16h	10,68
17h	9,56
18h	10,12
19h	10,11
20h	8,34
21h	8,47
22h	8,89
23h	8,86

Nous remarquons que les rapports varient entre 8,34 à 20H et 11,96 à 07h.

Nous allons utiliser ces rapports sur la journée type pour évaluer les consommations sur les autres jours de l'année concernant le territoire mahorais, en se basant sur les données de production horaire de La Réunion.

Étant donné que pour Mayotte, nous sommes en présence des profils de production maximum sur les années 2006-2014, nous faisons l'hypothèse qu'il n'y a pas de pertes réseaux. Du coup, en faisant la division des données de production horaire sur La Réunion par le rapport que nous avons obtenu entre La Réunion et Mayotte, nous estimons pouvoir retomber sur les valeurs de consommation sans affecter un coefficient de perte. Cependant, dans l'incertitude, nous avons testé la méthode avec et sans perte et nous avons choisi celle qui a donné les résultats les plus représentatifs. Par représentatifs, nous sous-entendons que nous allons comparer le résultat obtenu à la prévision que nous avons effectué sur R au niveau mensuelle, et nous avons les valeurs qui se rapproche le plus des données mensuelles obtenus avec R à l'aide du package "forecast".

4.2.1.4 - Mise en œuvre du fichier de consommation horaire électrique de Mayotte

Le calcul de la consommation horaire électrique du département de Mayotte se fait en se basant sur les données de production horaire électrique de son département voisin, de La Réunion, dont les données sont disponibles auprès d'EDF. Afin de calculer la consommation horaire électrique de Mayotte, nous prenons les données de production à La Réunion et nous les divisons par un rapport de consommation horaire sur la journée type donnée au niveau du Tableau 4.33. Ces calculs sont réalisés à l'aide du logiciel Excel de Microsoft. L'équation permettant de calculer les consommations électriques horaires sur Mayotte est la suivante :

Équation 12 : Calcul de la consommation électrique horaire sur Mayotte

$$C_{Mij} = \frac{P_{Rij}}{r_i}$$

Où :

C_{Mij} : représente la consommation électrique de Mayotte sur une heure i et une journée j .

P_{Rij} : représente la production électrique de La Réunion sur une heure i et une journée j obtenu auprès d'EDF.

r_i : représente le rapport de la journée type sur l'heure i donné au niveau du Tableau 4.33.

Les résultats sont obtenus à l'aide d'un fichier développé sur Excel. Nous nous sommes rendu compte que c'est la consommation totale annuelle sans coefficient de perte qui se rapproche le mieux des prévisions de consommation effectuées avec le logiciel R. Nous avons obtenu les profils de résultats présentés sur la Figure 4.13.

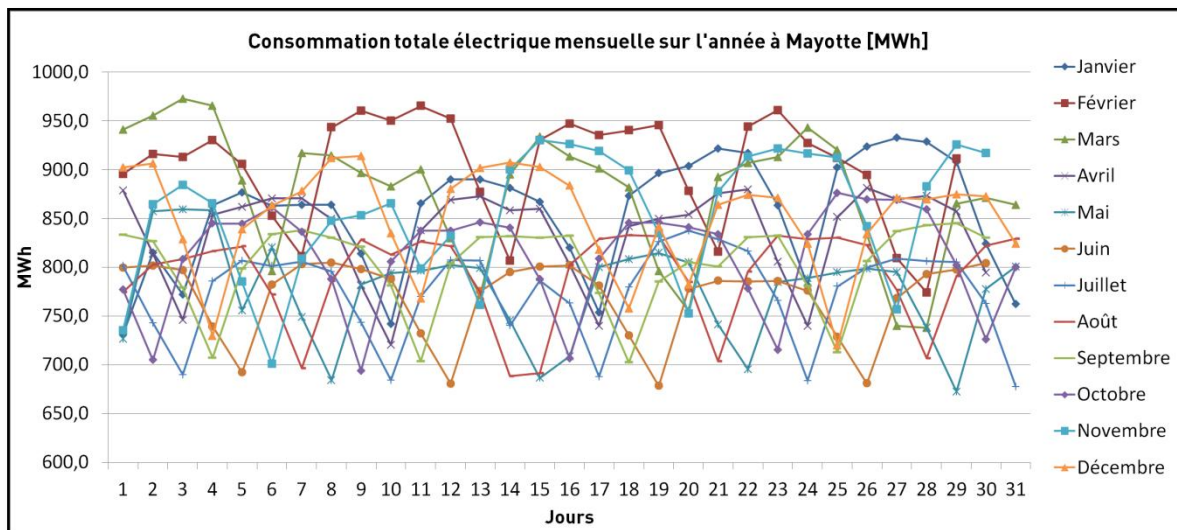


Figure 4.13 : Profil des consommations totales électriques mensuelles à Mayotte

Cette Figure 4.13 permet de constater que ce sont les courbes des mois de Février et Mars qui ont les pics de consommation les plus élevés. Et les mois de Juin et Juillet qui contiennent les consommations les plus basses.

4.2.1. 5 - Analyse du fichier de consommation

Les données présentées sur cette section 4.2.1.5 portent sur des estimations sur l'année 2020.

4..2.1.5. 1 - Échelle journalière

Nous donnons ci-dessous un exemple de sortie de résultat sur la journée du 27 janvier.

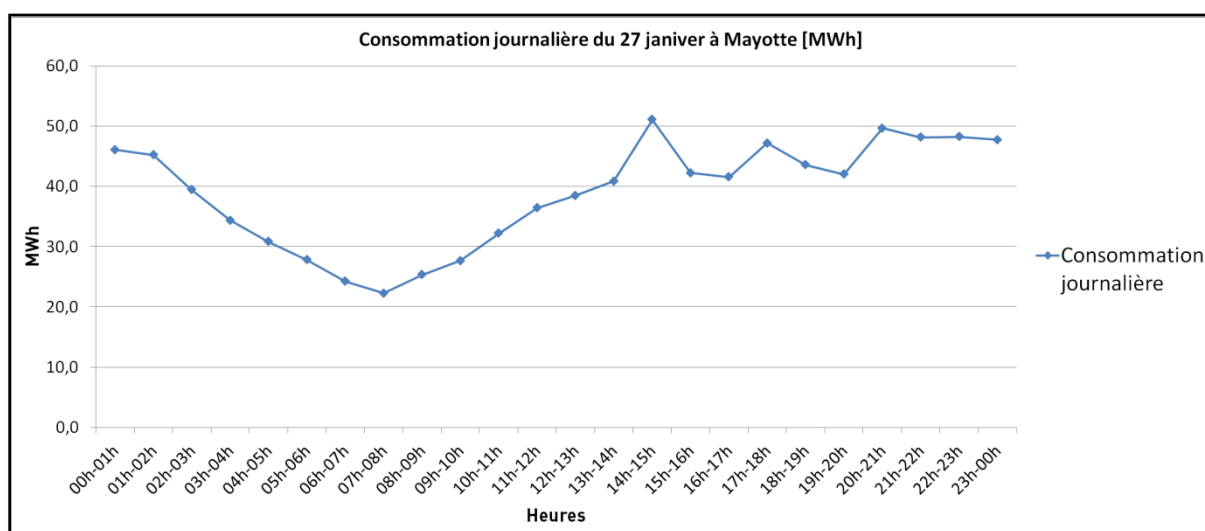


Figure 4.14 : Consommation sur la journée du 27 janvier à Mayotte [MWh]

Nous observons que le soir la consommation diminue, et le matin à partir de 07h, la consommation électrique commence à augmenter.

4..2.1.5. 2 - Échelle hebdomadaire

Nous donnons ci-dessous un exemple de sortie de résultat au pas de temps hebdomadaire pour le mois de Janvier.

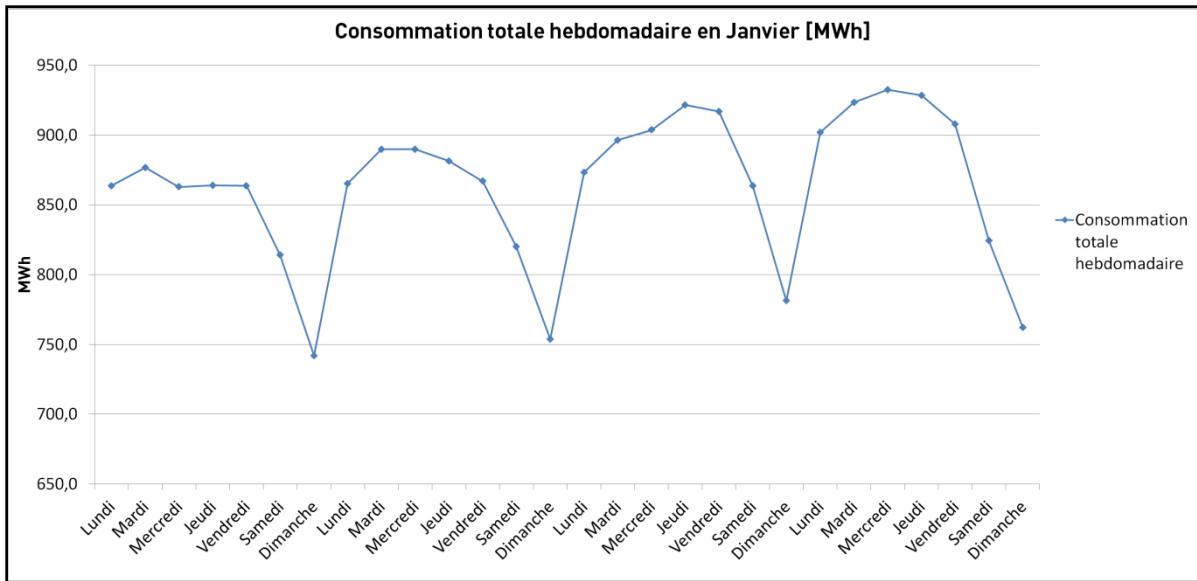


Figure 4.15 : Courbes de charge hebdomadaire sur les semaines en Janvier à Mayotte [MWh]

Cette Figure 4.15 affiche les mêmes tendances que celle de la Figure 4.10 portant sur La Réunion. Nous remarquons que la différence réside sur l'amplitude des valeurs comme sur la Figure 4.5.

4..2.1.5. 3 - Échelle mensuelle

Nous donnons ci-dessous un exemple de sortie de résultat au niveau mensuel.

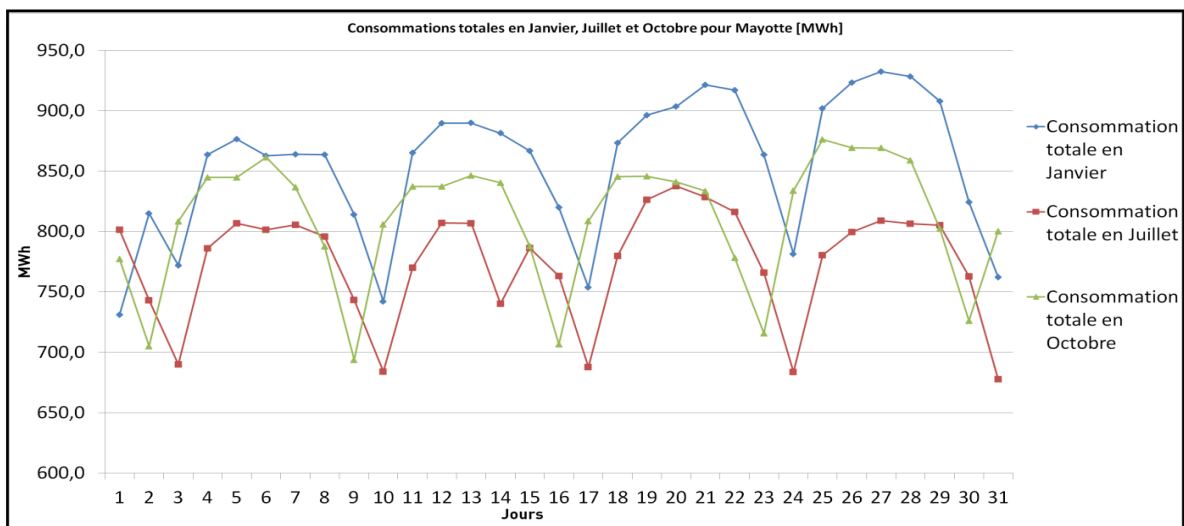


Figure 4.16 : Consommations totales en Janvier, Juillet et Octobre pour Mayotte [MWh]

Pour le mois de Janvier, contrairement au mois de Juillet et Octobre, nous remarquons que plus nous nous rapprochons de la fin du mois, et plus la hauteur de la courbe représentant sa

consommation électrique augmente progressivement. Le mois de Janvier correspond à un mois de reprise scolaire, ce qui peut expliquer cette situation de consommation progressive.

4.2.1.5. 4 - Échelle annuelle

Nous présentons ci-dessous une sortie graphique pour la consommation électrique annuelle sur Mayotte.

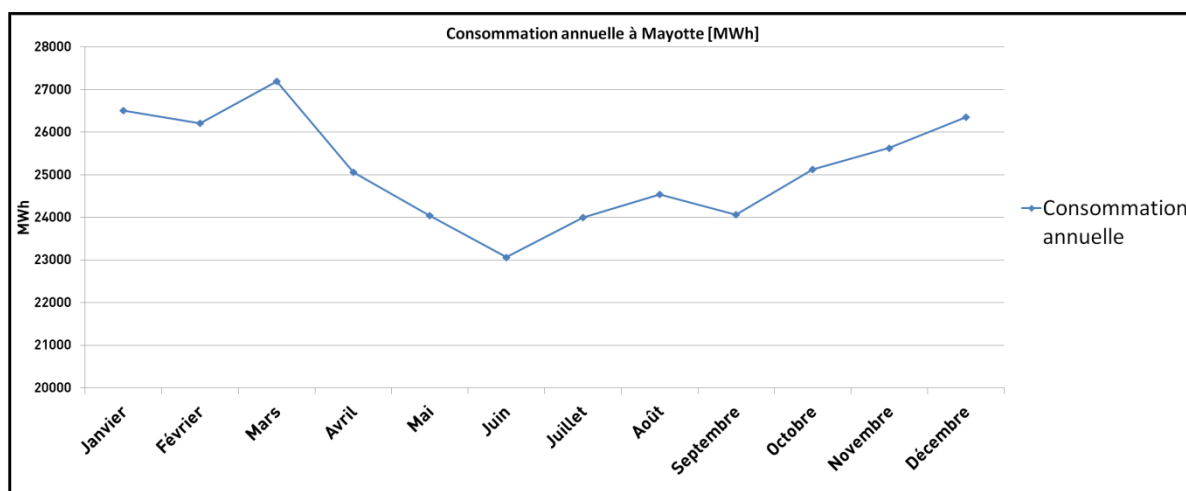


Figure 4.17 : Consommation électrique annuelle pour Mayotte [MWh]

Nous remarquons que la courbe est au maximum en début et fin d'année et inversement sur les autres mois. Ceci est logique, car la consommation est beaucoup plus élevée sous les tropiques pendant l'été austral que l'hiver austral. Nous tenons à préciser que la consommation électrique annuelle, calculée à partir de l'outil mis en place, du territoire de Mayotte est de 301 772 MWh. Nous souhaitons intégrer l'installation de PV qui puisse répondre à cette consommation. Cependant, avec une consommation de cette amplitude sur le territoire, il va être fastidieux de monter un seul système qui puisse répondre à l'ensemble des besoins du territoire au niveau de la consommation électrique. Dès lors, nous nous sommes orientés sur un partage du territoire de Mayotte en plusieurs zones afin de dispatcher et réduire la taille du système en fonction de la demande électrique des zones que nous allons créer.

4.2.1.6 - Reconstitution à une échelle plus réduite au niveau du territoire mahorais

Nous avons décidé de partager le territoire de Mayotte en cinq zones distinctes. Ce partage s'inspire du découpage intercommunal des communes de Mayotte. En effet, le 13 mai 2015, le conseil départemental de Mayotte a procédé à un découpage de l'ensemble des communes de Mayotte en cinq intercommunalités. Ce découpage est présenté sur la Figure 4.18 ci-dessous.

CARTE INTERCOMMUNALE DE MAYOTTE ET POPULATION ASSOCIEE EN 2017

Carte validée par la CDCI du 13 Mai 2015

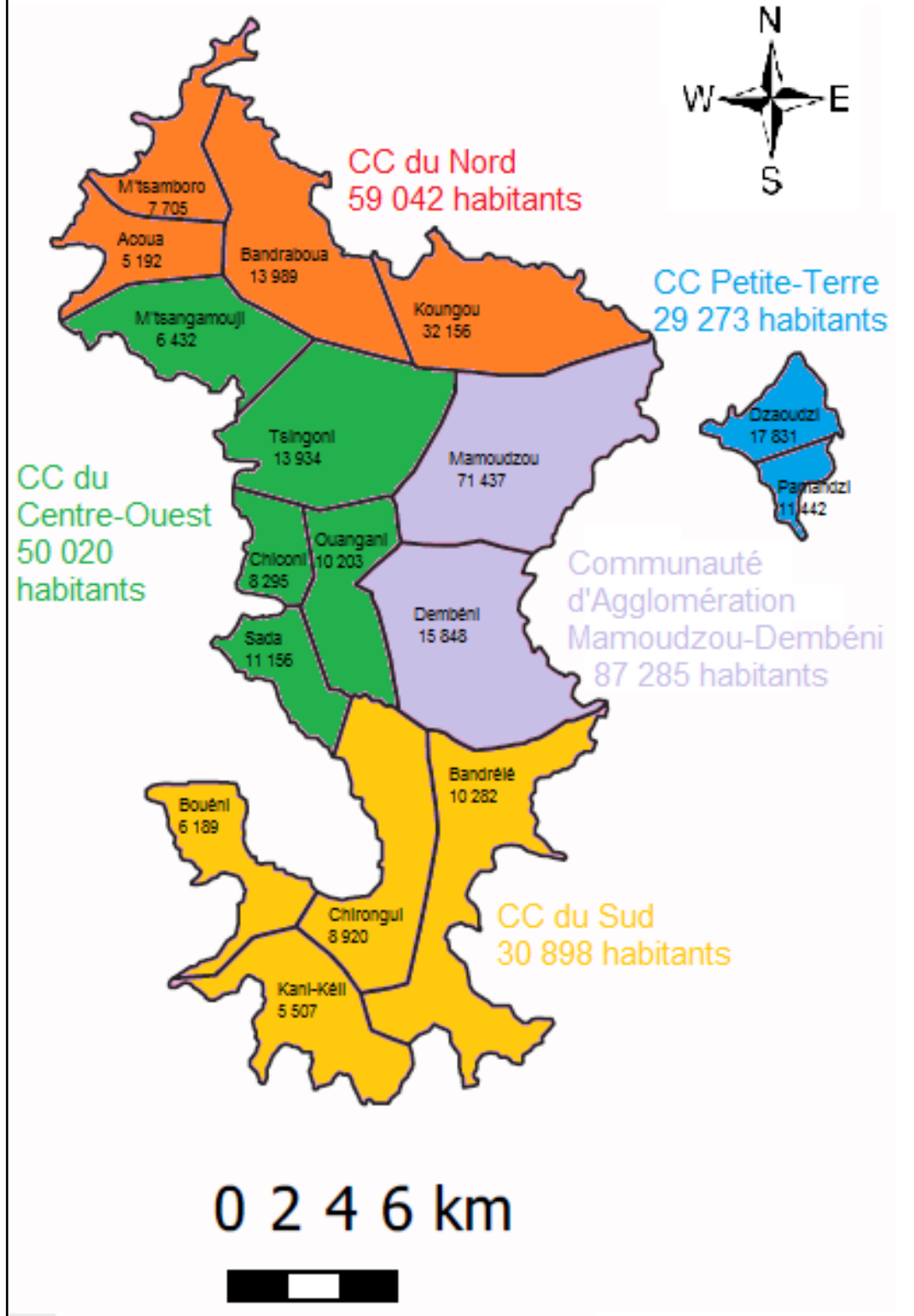


Figure 4.18 : Carte intercommunale de Mayotte

Au niveau de cette carte, nous observons cinq zones qui correspondent aux intercommunalités de Mayotte. Elles sont les suivantes :

- Mamoudzou et Dembeni qui forment ensemble une communauté d'agglomération. Elle regroupe la part de population la plus élevée sur l'île avec 68 204 habitants recensés en 2012. En nous basant sur le Tableau 4.25, nous avons pu estimer la population totale pour 2016 et 2020 qui nous a ensuite permis d'estimer la part de population de cette zone à 77 118 habitants en 2016 et 85 254 habitants en 2020. Cette zone représentera la zone1;
- Acoua, M'tsamboro, Bandraboua et Koungou qui forment la communauté de commune du Nord. En 2012, la population était de 49 139 habitants, en 2016, nous avons estimé la population à 55 429 habitants et 61 276 habitants en 2020. Cette zone représentera la zone2;
- Sada, Chiconi, Ouangani, Tsingoni et M'tsangamouji qui forment la communauté de commune du Centre. En 2012, la population était de 43 845 habitants, en 2016, nous avons estimé la population à 50 609 habitants et 55 948 habitants en 2020. Cette zone représentera la zone3;
- Bouéni, Kani-kéli, Chirongui et Bandrélé qui forment la communauté de commune du Sud. En 2012, la population était de 27 254 habitants, en 2016, nous avons estimé la population à 31 329 habitants et 34 634 habitants en 2020. Cette zone représentera la zone4;
- Dzaoudzi et Pamandzi qui forment la communauté de commune de Petite-Terre. En 2012, la population était de 24 203 habitants, en 2016, nous avons estimé la population à 26 509 habitants et 29 306 habitants en 2020. Cette zone représentera la zone5.

L'étude se concentre sur l'installation de PV sur ces cinq zones afin de pouvoir lisser la courbe d'appel réseau au niveau des pics de consommation. Pour évaluer la consommation électrique de chaque zone au pas de temps horaire, nous allons procéder au partage de la consommation calculée au niveau du territoire en fonction de la part de population de chaque zone (prorata de la population sur chaque zone). En effet, nous avons vu au niveau de la Figure 4.6 que la consommation électrique est fortement corrélée avec la population. Nous calculons les prorata de la population de chaque zone par rapport à la population totale. Ensuite, nous définissons comme hypothèse que ce prorata reste le même en 2016 et 2020. Pour 2012, selon l'enquête de l'INSEE, la population était de 212 645 habitants, le prorata de chaque zone donne :

- Zone1 : nous avons au total 68 204 habitants, ce qui représente un pourcentage de 32% d'habitants par rapport à la population totale;
- Zone2 : nous avons au total 49 139 habitants, ce qui représente un pourcentage de 23% d'habitants par rapport à la population totale;
- Zone3 : nous avons au total 43 845 habitants, ce qui représente un pourcentage de 21% d'habitants par rapport à la population totale;
- Zone4 : nous avons au total 27 254 habitants, ce qui représente un pourcentage de 13% d'habitants par rapport à la population totale;
- Zone5 : nous avons au total 24 203 habitants, ce qui représente un pourcentage de 11% d'habitants par rapport à la population totale.

Nous savons qu'en 2016, la consommation électrique totale calculée, à partir de l'Outil développé, est de 301 772 MWh (sur le logiciel R, on avait trouvé une prévision de 304 328 MWh en utilisant le package "forecast") et la population estimée est de l'ordre de 240 995 habitants. Lorsque, nous connaissons la population sur chaque zone, nous allons pouvoir calculer la part de consommation

électrique de chaque zone au prorata de sa population respective. Ce qui donne les valeurs suivantes :

- En zone1, nous avons une population de 77 118 habitants, ce qui correspond à une consommation électrique de 96 567 MWh par rapport au prorata de la population de la zone1;
- En zone2, nous avons une population de 55 429 habitants, ce qui correspond à une consommation électrique de 69 408 MWh par rapport au prorata de la population sur cette zone2;
- En zone3, nous avons une population de 50 609 habitants, ce qui correspond à une consommation électrique de 63 370 MWh par rapport au prorata de la population dans cette zone3;
- En zone4, nous avons une population de 31 329 habitants, ce qui correspond à une consommation électrique de 39 230 MWh par rapport au prorata de la population de la zone4;
- En zone5, nous avons une population de 26 509 habitants, ce qui correspond à une consommation électrique de 33 196 MWh par rapport au prorata de la population de la zone5.

Le Tableau 4.34 ci-dessous regroupe respectivement la population ainsi que la consommation électrique estimée sur chaque zone sur les années 2016 et 2020. L'estimation de la population en 2020 a été effectuée sur le logiciel R. En calculant la variation de la population entre 2016 et 2020, nous sommes tombés sur une valeur de 11%. Nous avons appliqué ce pourcentage au niveau de la consommation électrique horaire sur l'année 2016 afin d'évaluer ceux de 2020.

Nous allons à présent les résultats graphiques à différentes échelles pour 2016 et 2020.

4..2.1.6. 1 - Résultats à l'échelle journalière 2016

La Figure 4.19 ci-dessous présente la consommation journalière sur les différentes zones définies sur Mayotte pour une journée du 27 janvier.

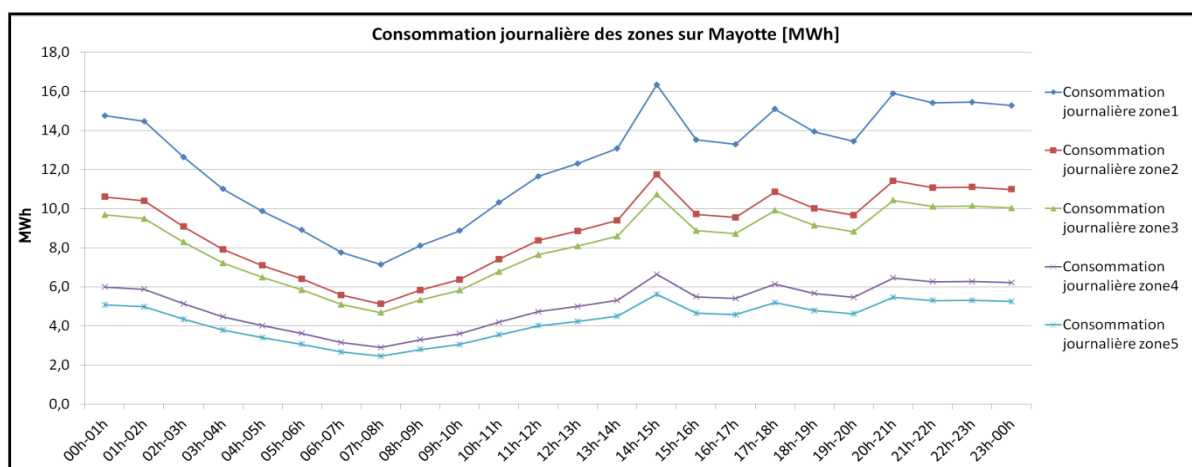


Figure 4.19 : Consommation journalière des zones sur Mayotte [MWh]

4.2.1.6. 2 - Résultats à l'échelle hebdomadaire 2016

La Figure 4.20 ci-dessous présente la consommation hebdomadaire en Janvier sur les différentes zones du territoire de Mayotte.

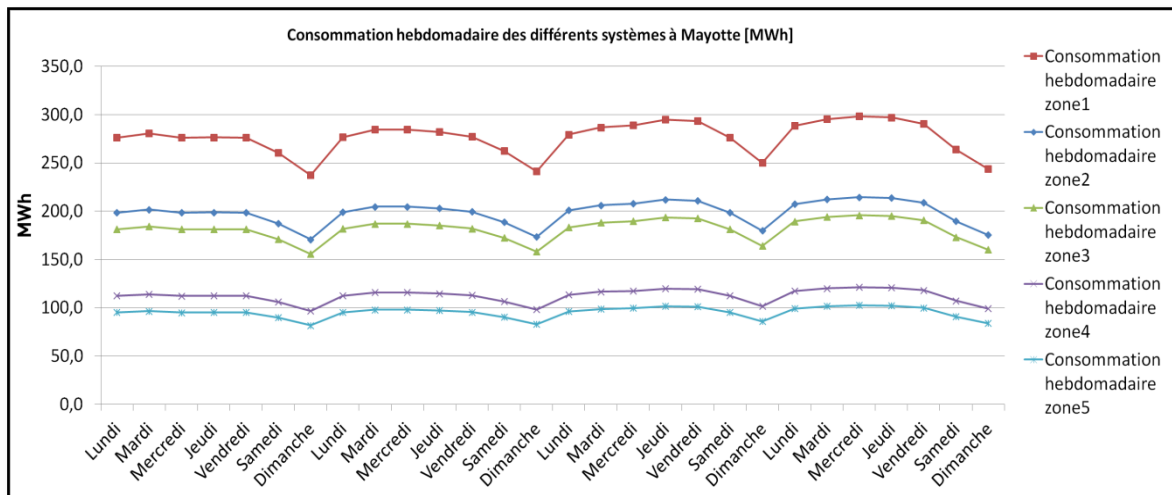


Figure 4.20 : Consommation hebdomadaire des différents systèmes à Mayotte [MWh]

4.2.1.6. 3 - Résultats à l'échelle mensuelle 2016

La Figure 4.21 ci-dessous présente la consommation mensuelle en Janvier sur les différentes zones du territoire de Mayotte.

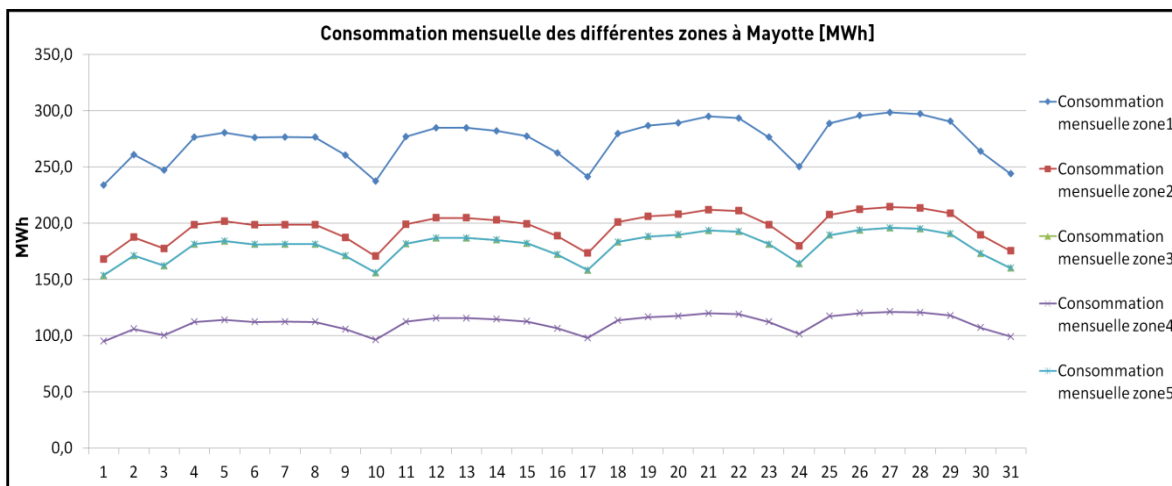


Figure 4.21 : Consommation mensuelle en Janvier des différentes zones à Mayotte [MWh]

4.2.1.6. 4 - Résultats à l'échelle annuelle 2016

La Figure 4.22 ci-dessous présente la consommation annuelle sur les différentes zones du territoire de Mayotte.

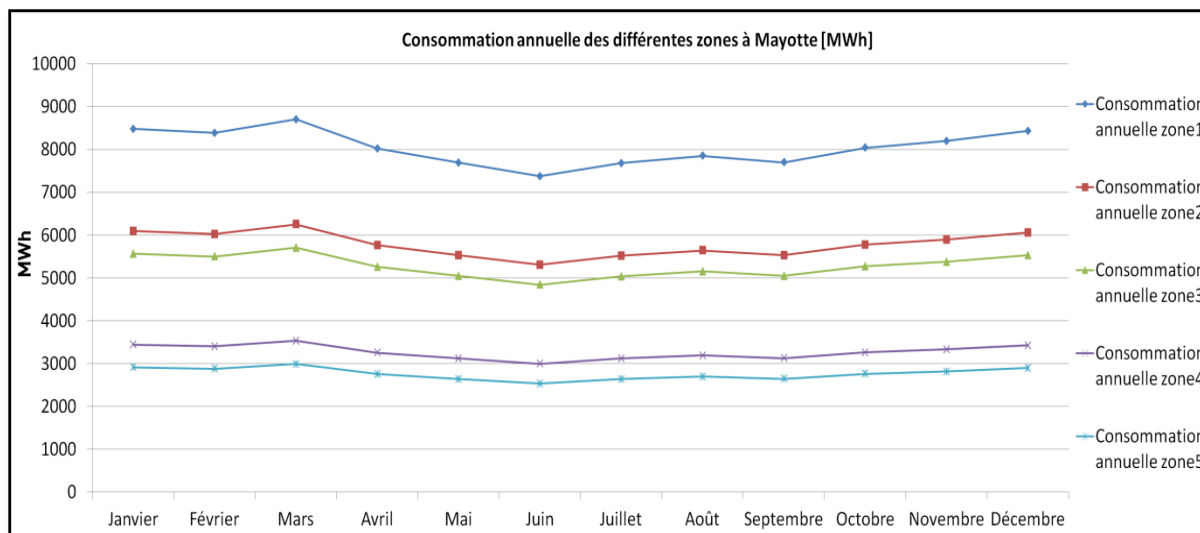


Figure 4.22 : Consommation annuelle des différentes zones à Mayotte [MWh]

4.2.1.6. 5 - Résultats à l'échelle journalière 2020

La Figure 4.23 ci-dessous présente la consommation journalière sur la journée du 27 janvier sur les différentes zones du territoire de Mayotte.

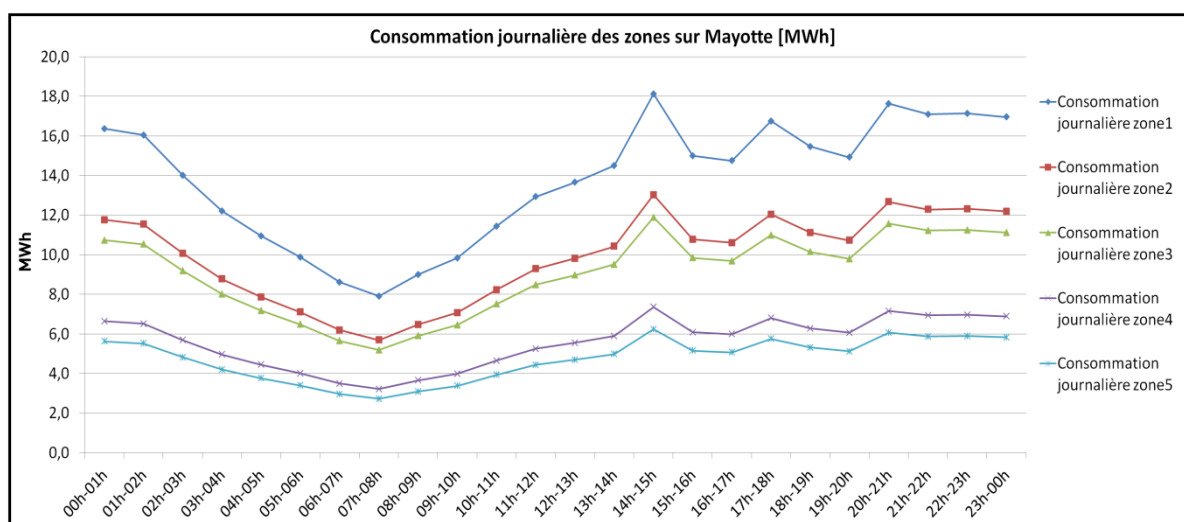


Figure 4.23 : Consommation journalière des différentes zones sur Mayotte [MWh]

4.2.1.6. 6 - Résultats à l'échelle hebdomadaire 2020

La Figure 4.24 ci-dessous présente la consommation hebdomadaire sur les semaines de janvier sur les différentes zones du territoire de Mayotte.

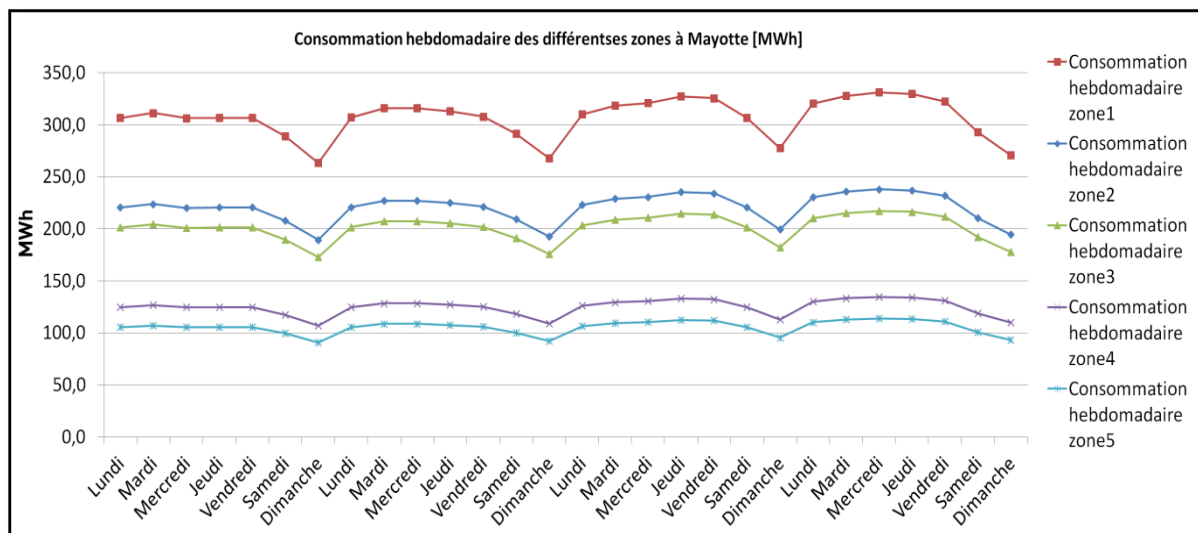


Figure 4.24 : Consommation hebdomadaire des différentes zones sur Mayotte [MWh]

4.2.1.6. 7 - Résultats à l'échelle mensuelle 2020

La Figure 4.25 ci-dessous présente la consommation mensuelle de janvier sur les différentes zones du territoire de Mayotte.

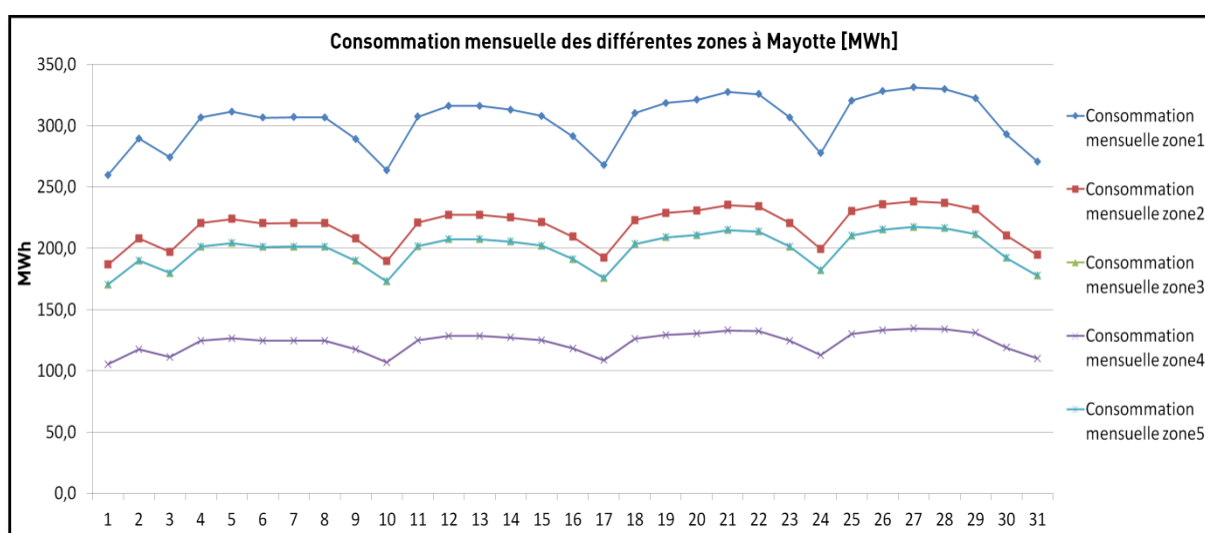


Figure 4.25 : Consommation mensuelle des différentes zones sur Mayotte [MWh]

4..2.1.6. 8 - Résultats à l'échelle annuelle 2020

La Figure 4.26 ci-dessous présente la consommation annuelle sur les différentes zones du territoire de Mayotte.

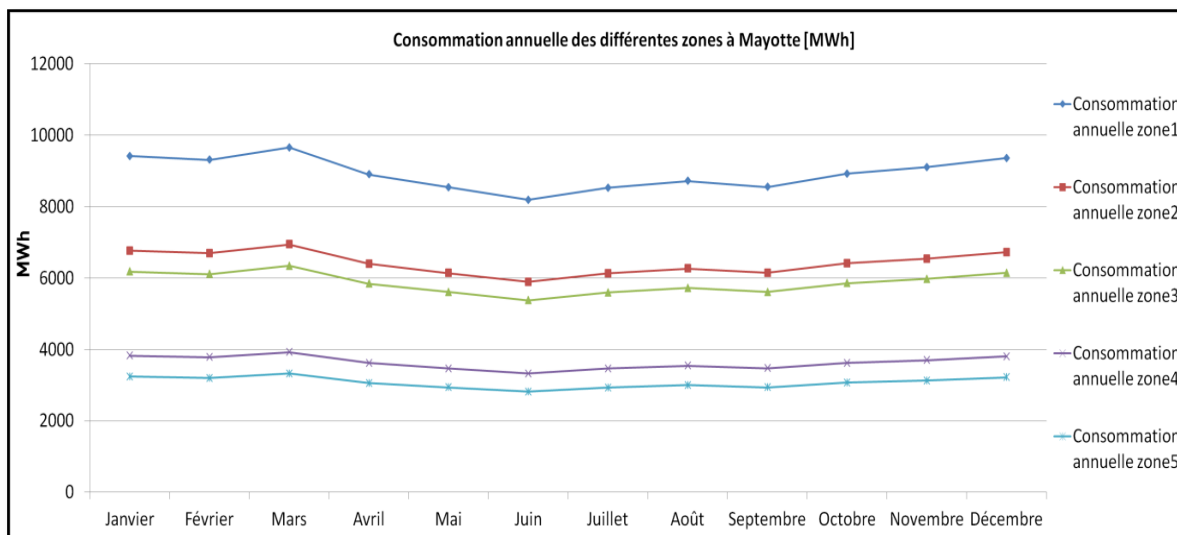


Figure 4.26 : Consommation annuelle des différentes zones sur Mayotte [MWh]

Le Tableau 4.34 qui suit fait un récapitulatif des différentes données et résultats sur 2016 et 2020.

Tableau 4.34 : Récapitulatif des résultats de Mayotte et des différentes zones en 2016 et 2020

Année 2016												
Mois	Territoire		Zone1		Zone2		Zone3		Zone4		Zone5	
	Consommation [MWh]	Population	Consommation [MWh]	Population	Consommation [MWh]	Population	Consommation [MWh]	Population	Consommation [MWh]	Population	Consommation [MWh]	Population
Janvier	26 508	240 995	8 483	77 118	6 097	55 429	5 567	50 609	3 446	31 329	2 916	26 509
Février	26 206		8 386		6 027		5 503		3 407		2 883	
Mars	27 191		8 701		6 254		5 710		3 535		2 991	
Avril	25 059		8 019		5 764		5 262		3 258		2 757	
Mai	24 042		7 693		5 530		5 049		3 125		2 645	
Juin	23 063		7 380		5 304		4 843		2 998		2 537	
Juillet	23 996		7 679		5 519		5 039		3 120		2 640	
Août	24 540		7 853		5 644		5 153		3 190		2 699	
Septembre	24 064		7 700		5 535		5 053		3 128		2 647	
Octobre	25 125		8 040		5 779		5 276		3 266		2 764	
Novembre	25 629		8 201		5 895		5 382		3 332		2 819	
Décembre	26 349		8 432		6 060		5 533		3 425		2 898	
Total	301 772	240 995	96 567	77 118	69 408	55 429	63 370	50 609	39 230	31 329	33 196	26 509
Année 2020												
Mois	Territoire		Zone1		Zone2		Zone3		Zone4		Zone5	
	Consommation [MWh]	Population	Consommation [MWh]	Population	Consommation [MWh]	Population	Consommation [MWh]	Population	Consommation [MWh]	Population	Consommation [MWh]	Population
Janvier	29 424	266 418	9 416	85 254	6 768	61 276	6 179	55 948	3 825	34 634	3 237	29 306
Février	29 088		9 308		6 690		6 109		3 781		3 200	
Mars	30 183		9 658		6 942		6 338		3 924		3 320	
Avril	27 816		8 901		6 398		5 841		3 616		3 060	
Mai	26 686		8 540		6 138		5 604		3 469		2 935	
Juin	25 600		8 192		5 888		5 376		3 328		2 816	
Juillet	26 636		8 524		6 126		5 594		3 463		2 930	
Août	27 239		8 717		6 265		5 720		3 541		2 996	
Septembre	26 710		8 547		6 143		5 609		3 472		2 938	
Octobre	27 889		8 924		6 414		5 857		3 626		3 068	
Novembre	28 448		9 103		6 543		5 974		3 698		3 129	
Décembre	29 247		9 359		6 727		6 142		3 802		3 217	
Total	334 966	266 418	107 189	85 254	77 042	61 276	70 343	55 948	43 546	34 634	36 846	29 306

Nous observons que c'est la zone1 qui possède la consommation électrique la plus élevée. Dans cette zone se trouve la capitale de Mayotte. La Petite-Terre possède la consommation électrique la plus petite de l'île représentée par la zone5.

Pour l'installation des systèmes PV, nous allons privilégier en premier lieu les zones où la consommation est la plus élevée. Cependant, afin de faire attention à la limite d'intégration de 30% d'EnR sur le réseau, il faudra surveiller la production d'origine EnR pour qu'elle ne dépasse pas 30% d'intégration EnR au niveau du mix énergétique du territoire. Mais comme à Mayotte, les toitures des maisons des particuliers ne sont pas équipées de panneaux PV. Nous pouvons procéder à la mise en place de différents scénarios en plus de ce scénario idéal de 30% à atteindre. Le Tableau 4.35 ci-dessous reprend les scénarios que nous avons mis en place sur Mayotte.

Tableau 4.35 : Scénarios de la production électrique d'origine EnR définis sur Mayotte

Scénarios		Commentaires
2016 (Population estimée : 240 995; Consommation électrique estimée : 304 328 MWh)	Favorable	100% de l'énergie est produit par les EnR. Ce scénario est pour le moment utopiste.
	Intermédiaire	50% de l'énergie est produit par les EnR. Ce scénario est réalisable avec un grand effort à fournir.
	Défavorable	5% de l'énergie est produit par les EnR. Ce scénario est le scénario actuel pour le territoire de Mayotte
	Pilotage	500 m² de surface totale pour Mayotte (100 m ² par zone)
2020 (Population estimée : 266 418 ; Consommation électrique estimée : 365 578 MWh)	Favorable	100% de l'énergie est produit par les EnR. Ce scénario est pour le moment utopiste.
	Intermédiaire	50% de l'énergie est produit par les EnR. Ce scénario est réalisable avec un grand effort à fournir.
	Défavorable	5% de l'énergie est produit par les EnR. Ce scénario est le scénario actuel pour le territoire de Mayotte
	Pilotage	500 m² de surface totale pour Mayotte (100 m ² par zone)

Sur ce Tableau 4.35, la population est estimée à partir des données de recensement de l'INSEE en 2000, 2002, 2007 et 2012. Ensuite, nous estimons la population entre 2000 et 2012, là où la donnée est manquante, en s'aidant des taux de variation annuel de l'INSEE, puis sur les autres années en utilisant le logiciel R avec son package "forecast". Quant à la consommation, elle est estimée à partir du logiciel R avec le package "forecast".

Pour information, d'après le bilan énergétique de la France de 2016[112], la consommation électrique finale à Mayotte était de 303 000 MWh, celui estimée avec notre Outil est de 301 772 et avec le logiciel R en utilisant la fonction "forcast" est de 304 328 MWh. La marge d'erreur est très courte entre ces trois valeurs, elle est de moins de 1%.

4.2. 2 - Évaluation de la production électrique à partir d'EnR

Nous allons, maintenant, nous intéresser au potentiel de production énergétique de l'île de Mayotte à l'aide des énergies renouvelables et plus particulièrement du potentiel de production basé sur le photovoltaïque en se basant sur les différents scénarios présentés au niveau du Tableau 4.35.

4.2.2. 1 - Focus sur le PV

4..2.2.1. 1 - Type de PV retenu

Nous nous intéressons donc à l'énergie que peut produire l'installation de PV sur le territoire de Mayotte. Nous rappelons qu'il existe déjà sur l'île des installations de PV qui ont débuté en 2008. De nos jours, ces installations participent à un peu plus de 5% du mix électrique de l'île. La loi permet d'ingérer jusqu'à 30% de production énergétique à partir des EnR sur le réseau, donc il existe encore de la marge. D'après le Grenelle de l'environnement, d'ici 2020 Mayotte doit tendre vers 30% de part d'EnR sur son mix énergétique.

Nous nous focalisons sur l'intégration de production photovoltaïque basée sur des modules de type polycristallin, car ils possèdent plusieurs avantages notamment un bon rendement sur des zones fortement ensoleillées comme Mayotte, une durée de vie élevée et un bon rapport qualité-prix. Une cellule photovoltaïque est composée de matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et permet de la transformer directement en courant électrique.

Il existe d'autres types de panneaux photovoltaïques que le polycristallin, par exemple :

- les PV de type cellule multi jonction;
- les PV de type silicium monocristallin;
- les PV de type sans silicium en couche mince CIS;
- les PV de type silicium amorphe en couche mince;
- les PV de type CZTS (Cuivre Zinc Etain Soufre).

4..2.2.1. 2 - Évaluation de la production PV

Nous allons faire l'évaluation de la production énergétique d'origine renouvelable basée sur le PV afin de répondre à la demande de consommation calculée au niveau de la section 4.3.4.2. Nous nous basons sur l'Équation 1 du chapitre 2.

Nous avons ensuite créé un outil permettant d'évaluer la production électrique d'origine PV.

Au niveau de l'Outil développé, il faut rentrer quelques données techniques afin de pouvoir lancer les simulations au niveau de la production. Nous donnons sur la Figure 4.27 ci-dessous un imprimé-écran d'une fenêtre d'acquisition de données sur les données techniques à renseigner à

l'Outil. Nous rappelons que pour fonctionner, l'Outil de simulation a besoin de deux paramètres. Le premier paramètre concerne les données techniques du système de production EnR sélectionnée et le second paramètre prend en compte les données météorologiques du site d'étude.

The screenshot shows a software interface for data acquisition. At the top, there are three horizontal bars: 'EnR. DEPARTEMENT DE MAYOTTE' (blue), 'PRODUCTION PHOTOVOLTAÏQUE' (orange), and 'FERME PHOTOVOLTAÏQUE' (grey). Below these is a purple bar labeled 'Données techniques : Ferme Photovoltaïque'. The main area contains a table with 10 columns: 'Composant', 'Surface des capteurs solaires (m²)', 'Puissance crête d'un capteur [Wc]', 'Nombre de capteurs', 'Orientation (en degré)', 'Inclinaison (en degré)', 'Coefficient de puissance de crête', 'Facteur de performance', 'Puissance solaire potentielle (P. installée) [KW]', and 'Puissance solaire effective (P. disponible)'. The last two columns have orange and green backgrounds respectively. At the bottom, there are four buttons: 'Données techniques' (highlighted with a blue border), 'Données météo', 'Production horaire et journalière dans le mois', and 'Résultats graphiques'. On the left, a sidebar lists various analysis and simulation options, with a vertical column of letters (J, F, M, A, M, J, J, A, S, O, N, D) next to it.

Figure 4.27 : Page d'acquisition de donnée de l'outil de production EnR sur Mayotte

Concernant les données techniques, nous devons renseigner dans l'outil les éléments suivants à propos du panneau photovoltaïque retenu :

- le type de PV,
- la surface totale de capteur installé,
- la puissance crête d'un capteur,
- le nombre de capteurs,
- l'orientation des capteurs (en degré),
- l'inclinaison des capteurs (en degré),
- le coefficient de puissance crête des capteurs,
- le facteur de performance des capteurs.

Pour valider l'Outil créé afin d'estimer la production énergétique d'origine EnR sur le territoire de Mayotte, nous avons décidé de faire des simulations sur des logiciels de production photovoltaïque existants et reconnues par la communauté scientifique dans le monde. Nous avons fait le choix de prendre le logiciel PVsyst et PVGIS afin de valider l'Outil créé. Pour cela, nous avons pris un cas d'étude de surface de capteurs de 250 000 m² et 500 m² pour l'ensemble du territoire, une orientation Nord, une inclinaison de 15°, un coefficient de puissance crête de 0,15 et un facteur de performance de 0,75. Nous avons fait les simulations sur deux surfaces différentes car les 250 000 m², c'est la surface nécessaire afin de répondre à la totalité de la consommation électrique sur notre modèle de simulation et 500 m² car cela devrait permettre de lisser les courbes de pic de consommation à l'heure habituelle des pics. Nous verrons ce qu'il en est au moment du pilotage. Les résultats sont présentés dans les sections suivantes.

4..2.2.1.2. 1 - Échelle journalière

Nous donnons ci-dessous les résultats de production électrique à partir du PV ($S = 250\ 000\ \text{m}^2$ et $S = 500\ \text{m}^2$) pour la journée du 27 janvier sur Mayotte.

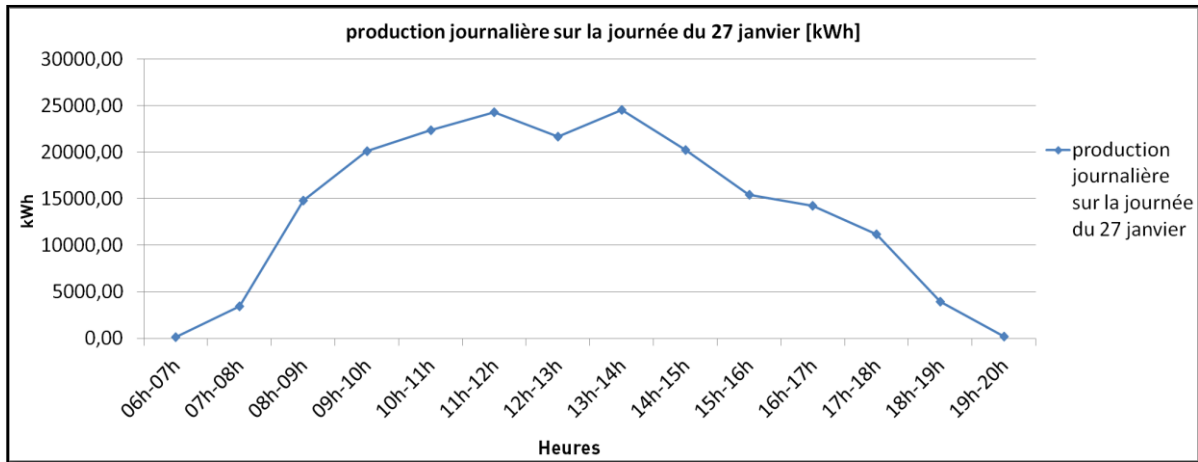


Figure 4.28 : Production photovoltaïque sur la journée du 27 janvier à Mayotte pour 250 000 m² de capteur [kWh]

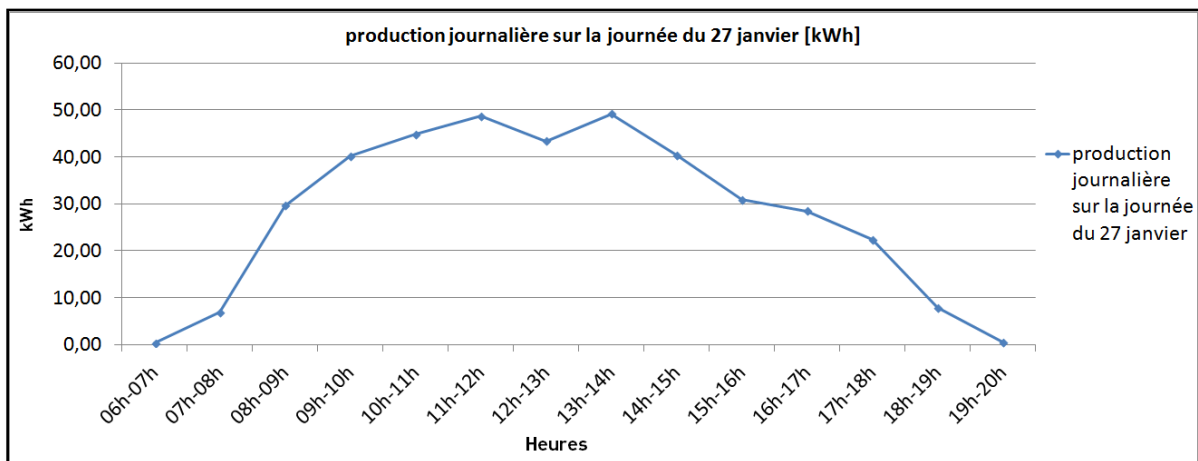


Figure 4.29 : Production photovoltaïque sur la journée du 27 janvier à Mayotte pour 500 m² de capteur [kWh]

Nous remarquons que pour la journée du 27 janvier, la production photovoltaïque débute vers 06h pour connaître un maximum de production vers 11h et 13h. Le pic de production électrique se situe environ à 25 000 kWh pour 250 000 m² de capteur et 50 kWh pour les 500 m². Ensuite, il entame une phase de décroissance pour finalement ne plus produire d'énergie vers 19h.

4..2.2.1.2. 2 - Échelle hebdomadaire

Nous donnons ci-dessous les résultats de production électrique à partir du PV (S = 250 000 m² et S = 500 m²) sur les semaines de Janvier.

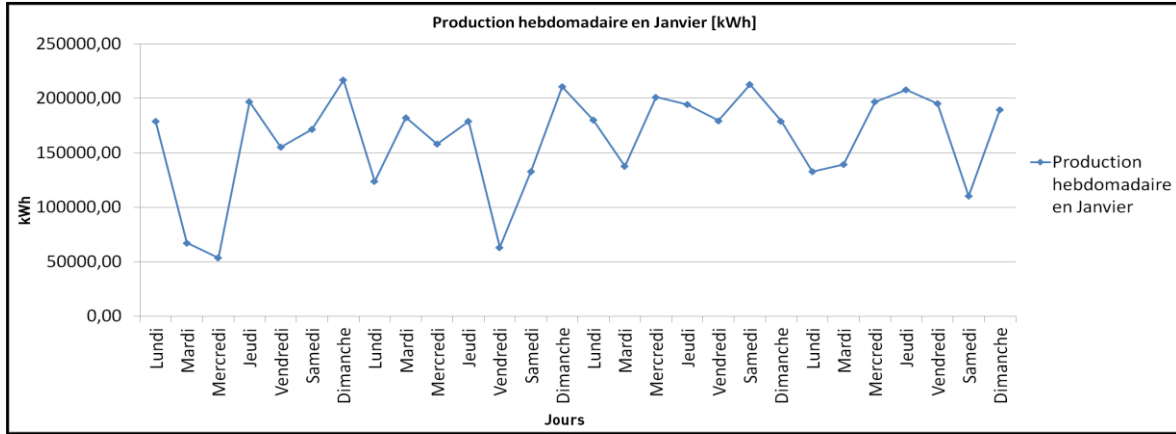


Figure 4.30 : Production Photovoltaïque (S = 250 000 m²) hebdomadaire en Janvier à Mayotte [kWh]

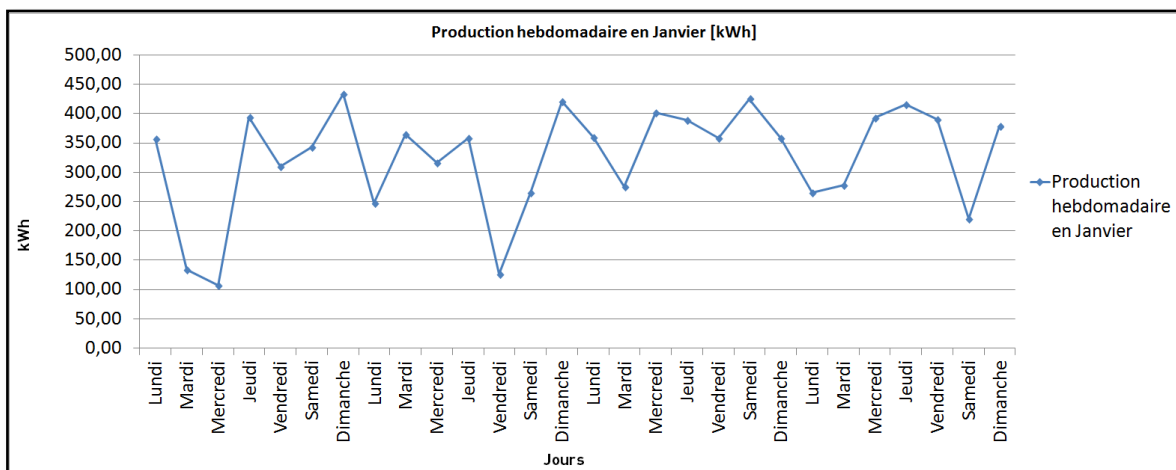


Figure 4.31 : Production Photovoltaïque (S = 500 m²) hebdomadaire en Janvier à Mayotte [kWh]

4..2.2.1.2. 3 - Échelle mensuelle

Nous donnons ci-dessous, les résultats de la production électrique à partir du PV (S = 250 000 m² et S = 500 m²) sur le mois de Janvier.

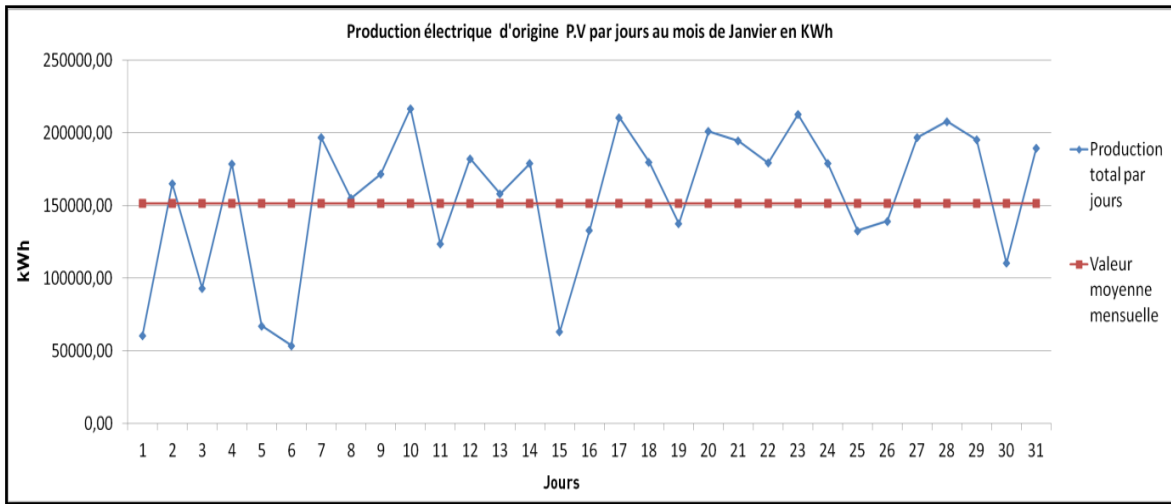


Figure 4.32 : Production PV ($S = 250\ 000\ m^2$) mensuelle à Mayotte [kWh]

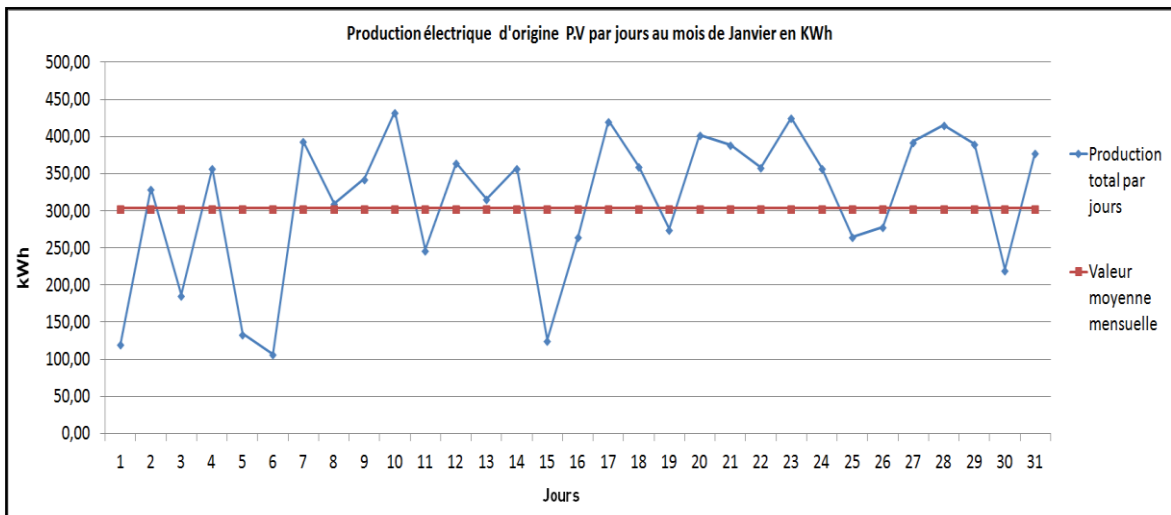


Figure 4.33 : Production PV ($S = 500\ m^2$) mensuelle à Mayotte [kWh]

4..2.2.1.2. 4 - Échelle annuelle

Nous présentons ci-dessous le graphique de la production photovoltaïque sur une année.

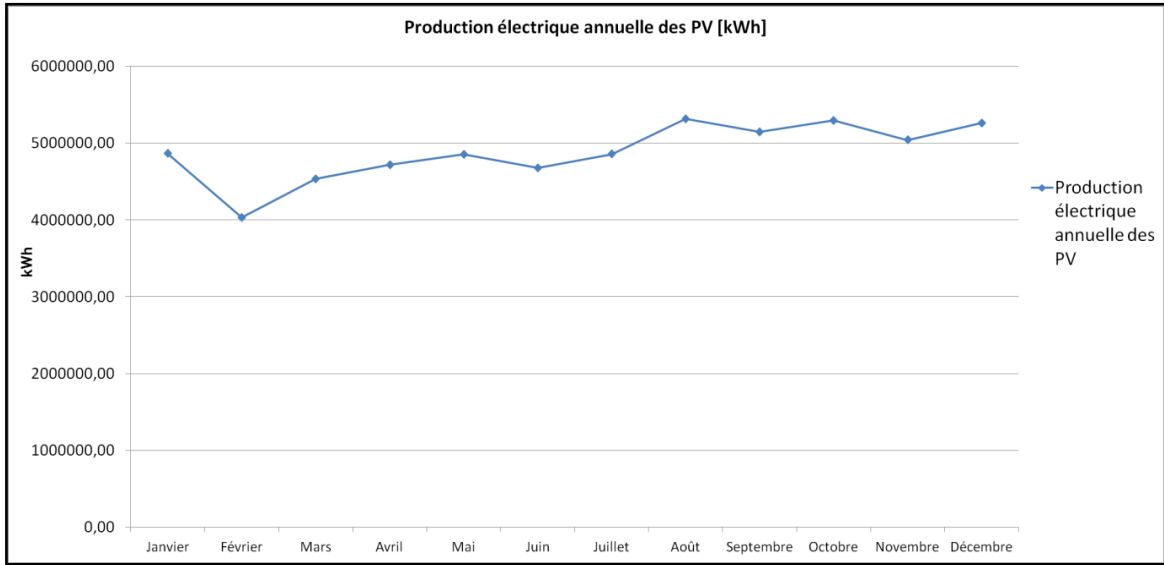


Figure 4.34 : Production électrique annuelle PV ($S = 250\,000\text{ m}^2$) à Mayotte [kWh]

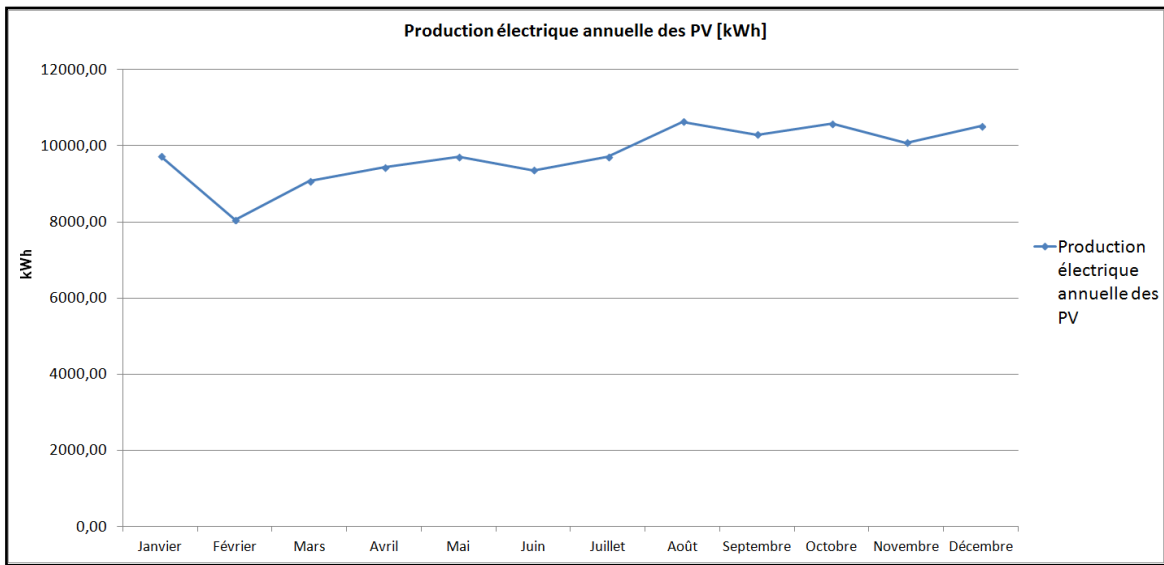


Figure 4.35 : Production électrique annuelle PV ($S = 500\text{ m}^2$) à Mayotte [kWh]

Nous récapitulons ci-dessous les valeurs obtenues sur chaque mois dans l'année au niveau de l'outil de simulation de la production électrique sur Mayotte.

Tableau 4.36 : Résultats des simulations de l'Outil sur la production EnR pour Mayotte

Mois	Production du système PV (S = 250 000 m ²) [kWh]	Production du système PV (S = 500 m ²) [kWh]
Janvier	4 863 353	9 727
Février	4 029 765	8060
Mars	4 535 891	9072
Avril	4 716 155	9432
Mai	4 852 808	9706
Juin	4 679 668	9359
Juillet	4 857 193	9714
Août	5 316 245	10 633
Septembre	5 146 703	10 293
Octobre	5 393 561	10 587
Novembre	5 041 101	10 082
Décembre	5 259 766	10 520
Total	58 692 209	117 185

Le Tableau 4.36 nous permet de voir que la production d'origine EnR la plus élevée sur le territoire de Mayotte est enregistrée sur les mois d'août et d'octobre selon que la surface totale des capteurs soit relativement grande ou relativement petite. Même si ce sont des mois d'hiver, nous connaissons que pendant ces mois il y a beaucoup moins de pluie qu'en été austral[113], ce qui peut expliquer ce résultat au niveau de la production EnR.

4.2.2. 2 - Validation de l'outil de production

Pour valider l'outil créé afin d'estimer la production électrique d'origine EnR sur le territoire de Mayotte, nous avons effectué des simulations sur des logiciels de production photovoltaïque existants et reconnus par la communauté scientifique dans le monde. Nous avons fait le choix de prendre le logiciel PVsyst[114] et PVGIS[115] afin de valider l'outil créé. Pour cela, nous avons pris deux cas d'étude pour des surfaces de capteur respectives de 250 000 m² et 500 m², une orientation Nord, une inclinaison de 15°, un coefficient de puissance crête de 0,15 et un facteur de performance de 0,75. Nous avons eu les résultats présentés ci-dessous.

4..2.2.2. 1 - Validation avec PVsyst

PVsyst est un logiciel de prédimensionnement photovoltaïque libre accès développé pour venir en aide aux chercheurs par exemple. PVsyst permet de réaliser un prédimensionnement de projet, une conception de projet, ou encore d'importer une base de données. Pour notre cas d'étude, nous nous intéressons à la phase de prédimensionnement qui consiste à réaliser une simulation pour avoir une estimation rapide de la production PV sur un site, afin de permettre d'avoir une idée sur la véracité des résultats de l'outil créé.

La première phase consiste à ouvrir le logiciel PVsyst, et choisir les paramètres d'étude que nous souhaitons réaliser. Dans notre cas, nous souhaitons un prédimensionnement couplé au réseau. Ensuite, nous devons lui fournir les coordonnées géographiques et les données météorologiques du lieu sur lequel nous souhaitons effectuer la simulation au niveau de l'onglet "Site et Météo" du logiciel. Il existe un onglet nommé "Horizon" qui permet de visualiser et d'ajuster en cas de besoin les paramètres d'ensoleillement du site: nous n'avons pas touché à cet onglet pour notre cas. Ensuite, il existe un onglet nommé "Système" sur lequel, il est demandé de renseigner les données spécifiques du système de production EnR, en l'occurrence les panneaux photovoltaïques. Sur cet onglet, nous avons effectué l'acquisition des paramètres d'entrée en utilisant les mêmes données que celle que nous avons effectuée au niveau de la Figure 4.27. Puis, nous avons également indiqué quelques paramètres spécifiques comme :

- le type de module → Standard;
- la disposition des panneaux → sur le sol;
- la technologie des panneaux → Polycristallin;
- les propriétés de ventilation → Libre.

À la suite de cela, nous avons lancé les simulations et nous avons obtenu les résultats présentés ci-dessous :

Tableau 4.37 : Résultats de simulation sur PVsyst pour Mayotte

Mois	Production du système PV (S = 250 000 m ²) [kWh]	Production du système PV (S = 500 m ²) [kWh]
Janvier	5 213 118	10 136
Février	4 950 128	9 585
Mars	5 887 653	10 700
Avril	6 006 954	11 100
Mai	6 297 076	12 068
Juin	5 961 907	11 531
Juillet	6 257 814	11 745
Août	6 693 295	13 480
Septembre	6 553 571	11 939
Octobre	6 650 090	11 832
Novembre	6 040 889	11 072
Décembre	5 738 654	10 790
Total	72 251 149	135 979

Nous visualisons sur ce Tableau 4.37, que la production PV la plus élevée se trouve sur les mois d'août, septembre et d'octobre. Ces résultats enregistrés sont en adéquation avec les résultats de simulation obtenus à partir de l'Outil développé.

Maintenant, allons voir les résultats de simulation obtenus à partir du logiciel de simulation PVGIS

4..2.2.2. 2 - Validation avec PVGIS

PVGIS[116] est un logiciel en ligne gratuit pour l'estimation de la production photovoltaïque en Afrique et en Europe. Elle permet à l'aide des paramètres donnés en entrée d'estimer la production photovoltaïque.

La première phase consiste à ouvrir le logiciel PVGIS, et choisir les paramètres d'étude souhaités. Dans notre cas, nous souhaitons un prédimensionnement couplé au réseau. Nous devons entrer les coordonnées géographiques du lieu sur lequel nous voulions effectuer la simulation sur la page de garde du logiciel. Ensuite, nous choisissons la base de données météorologique sur laquelle nous souhaitons effectuer les simulations. Il en existe deux sur PVGIS: il y a la base de données météorologique nommée "PVGIS-CMSAF" et "PVGIS-SARAH". Nous avons décidé de travailler sur la base de données "PVGIS-CMSAF", car ce sont des données météo récentes allant de 1998 à 2011 mesurant l'irradiation sur l'ensemble du globe à partir d'image satellitaire, tandis que l'autre base de données contient des données anciennes (allant de 1981 à 1990) issues uniquement de stations météo situées en Europe. En prenant en compte le changement au niveau climatique ressenti sur la terre ces dernières années, nous avons donc fait le choix de retenir la base de données "PVGIS-CMSAF" pour mener nos simulations sur PVGIS. Puis, nous avons renseigné le type de technologie du PV: nous avons choisi le type "Inconnue", car le modèle polycristallin n'est pas proposé sur PVGIS. Nous renseignons également la puissance crête installée, suivie du rendement de l'installation. De même, nous indiquons le type de positionnement du système: nous avons choisi le mode standard qui est défini sur libre. En dernier lieu, nous lui donnons l'inclinaison des panneaux et leur orientation et seulement après ces démarches, nous avons lancé les simulations.

Les résultats de simulation sont présentés sur le Tableau 4.38 ci-dessous.

Tableau 4.38 : Résultats de simulation sur PVGIS pour Mayotte

Mois	Production du système PV (S = 250 000 m ²) [kWh]	Production du système PV (S = 500 m ²) [kWh]
Janvier	4 310 000	10 100
Février	4 120 000	8 970
Mars	4 980 000	9 560
Avril	5 180 000	8 430
Mai	5 430 000	7 560
Juin	4 950 000	6 470
Juillet	5 260 000	7 090
Août	5 650 000	8 650
Septembre	5 730 000	10 200
Octobre	5 830 000	12 100
Novembre	5 150 000	12 000
Décembre	4 760 000	11 600
Total	61 350 000	112 730

Au niveau des deux surfaces, la production PV est plus élevée sur les mois d'octobre, septembre et août ce qui en adéquation avec les données de pluviométries du territoire. En effet, s'il y a des nuages les PV ne produisent pas de l'électricité.

Nous présentons sur le Tableau 4.39, le récapitulatif des données de production photovoltaïque issues de notre outil avec ceux des autres logiciels.

Tableau 4.39 : Récapitulatif de la production PV des différents systèmes pour Mayotte

Mois	Production du système PV sur l'Outil [kWh]		Production du système PV sur PVsyst [kWh]		Production du système PV sur PVGIS [kWh]			Écart Outil-PVsyst		Écart Outil-PVGIS	
	S = 250 000 m ²	S = 500 m ²	S = 250 000 m ²	S = 500 m ²	S = 250 000 m ²	S = 500 m ²		S = 250 000 m ²	S = 500 m ²	S = 250 000 m ²	S = 500 m ²
Janvier	4 863 353	9 727	5 213 118	10 136	4 310 000	10 100		7,2%	4,2%	-11,4 %	3,8%
Février	4 029 765	8 060	4 950 128	9 585	4 120 000	8 970		22,8%	18,9%	2,2%	11,3%
Mars	4 535 891	9 072	5 887 653	10 700	4 980 000	9 560		29,8%	17,9%	9,8%	5,4%
Avril	4 716 155	9 432	6 006 954	11 100	5 180 000	8 430		27,4%	17,7%	9,8%	-10,6%
Mai	4 852 808	9 706	6 297 076	12 068	5 430 000	7 560		29,8%	24,3%	11,9%	-22,1%
Juin	4 679 668	9 359	5 961 907	11 531	4 950 000	6 470		27,4%	23,2%	5,8%	-30,9%
Juillet	4 857 193	9 714	6 257 814	11 745	5 260 000	7 090		28,8%	20,9%	8,3%	-27,0%
Août	5 316 245	10 633	6 693 295	13 480	5 650 000	8 650		25,9%	26,8%	6,3%	-18,6%
Septembre	5 146 703	10 293	6 553 571	11 939	5 730 000	10 200		27,3%	16,0%	11,3%	-0,9%
Octobre	5 393 561	10 587	6 650 090	11 832	5 830 000	12 100		23,3%	11,8%	8,1%	14,3%
Novembre	5 041 101	10 082	6 040 889	11 072	5 150 000	12 000		19,8%	9,8%	2,2%	19,0%
Décembre	5 259 766	10 520	5 738 654	10 790	4 760 000	11 600		9,1%	2,6%	-9,5%	10,3%
Total	58 692 208	117 185	72 251 149	135 978	61 350 000	112 730	Moyenne	23,1%	16,0%	4,5%	-3,8%

À partir du Tableau 4.39, nous avons tracé les graphiques ci-dessous.

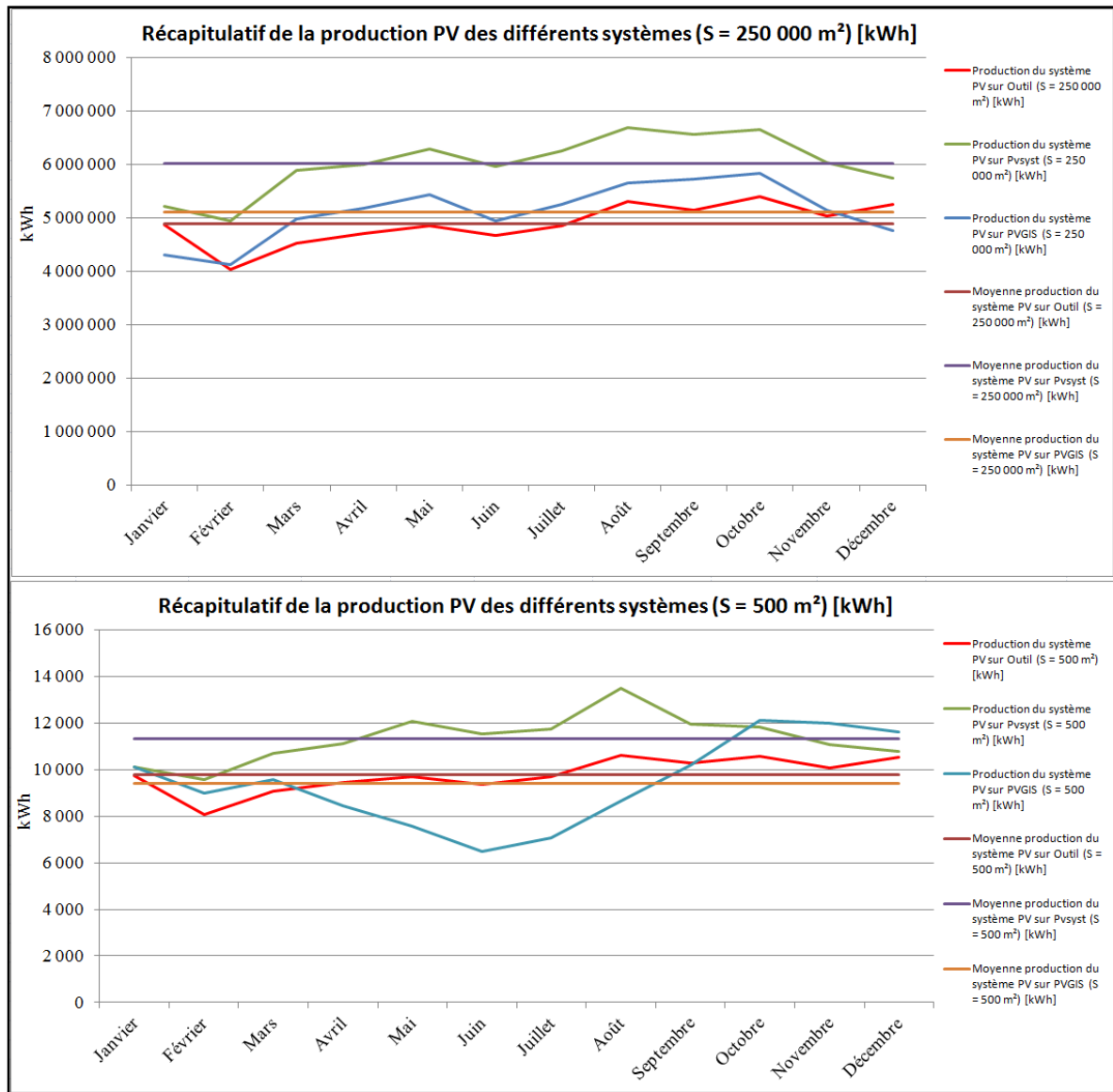


Figure 4.36 : Récapitulatif de la production PV pour différents systèmes sur Mayotte

La Figure 4.36 permet de visualiser que les productions PV des trois systèmes utilisés ont la même allure au cours de l'année pour 250 000 m² de capteurs et cela est moins visible pour 500 m² de capteurs. C'est le résultat obtenu au niveau de Pvsyst qui est plus élevé, ensuite vient PVGIS et après l'Outil développé. Cependant, les écarts entre les courbes de ces trois systèmes ne sont pas très importants. En effet, les moyennes de la production PV annuelle des trois systèmes est relativement faible surtout celui de PVGIS et notre Outil développé. La proximité des résultats ou des courbes obtenus permet de valider l'Outil de production électrique. Avec PVGIS, l'Outil présente l'écart le moins important dans l'année, avec un écart mesuré respectivement de 4,5% et 3,8%. Cet écart de mois de 5% permet encore plus la validation de l'Outil. Maintenant, nous pouvons l'utiliser afin de réaliser les différents scénarios présentés.

Nous venons de valider la robustesse de l'outil que nous avons développé sur Excel. Maintenant, nous allons passer à la phase de simulation de la production électrique sur les différentes zones définies en 2016 et 2020.

4.2.2. 3 - Estimation de la production PV sur 2016 pour les différentes zones définies

Sur cette section, nous allons faire une évaluation de la production EnR à partir du PV selon différents scénarios définis. Nous rappelons qu'en 2016, la consommation électrique a été estimée à 301 772 MWh réparties selon les différentes zones définies sur Mayotte de la manière suivante :

- 96 567 MWh pour la zone1;
- 69 408 MWh pour la zone2;
- 63 370 MWh pour la zone3;
- 39 230 MWh pour la zone4;
- 33 196 MWh pour la zone5.

Nous donnons sur le Tableau 4.40 ci-dessous, les différentes productions EnR à atteindre sur le territoire, selon les différents scénarios définis. Nous précisons que nous allons aussi réaliser des simulations en prenant comme données de départ, une surface de 100 m² de capteurs pour chaque zone. Ce qui fait une surface totale de 500 m² pour l'ensemble du territoire de Mayotte. Les résultats de production obtenus à partir de 100 m² de surface de capteur (pour chaque zone) vont nous permettre de réaliser le pilotage sur le territoire de Mayotte.

Tableau 4.40 : Description détaillée des scénarios selon la zone du territoire pour 2016

Consommation 2016 par zone [MWh]		Production à atteindre selon scénario [MWh]				Production calculée [MWh]
		100% EnR	50% EnR	5% EnR	30% EnR	100 m ² de capteur
Zone1	96 567	96 567	48 284	4829	28 970	23,437
Zone2	69 408	69 408	34 704	3470	20 822	23,437
Zone3	63 370	63 370	31 685	3 169	19 011	23,437
Zone4	39 230	39 230	19 615	1 962	11 769	23,437
Zone5	33 196	33 196	16 598	1660	9 959	23,437
Total territoire	301 771	301 771	150 886	15 090	90 531	117,185

Afin de prendre en compte les pertes sur le réseau, nous allons surestimer de 15% l'ensemble des productions à atteindre, qui sont indiquées dans le Tableau 4.40. Nous obtenons alors les nouveaux objectifs de production présentés sur le Tableau 4.41 ci-dessous.

Tableau 4.41 : Scénario de production majoré de 15%

Consommation 2016 par zone [MWh]		Production à atteindre selon scénario majoré de 15% [MWh]				Production calculée
		100% EnR	50% EnR	5% EnR	30% EnR	115 m ² de capteur
Zone1	96 567	111 052	55 526	5 553	33 316	27
Zone2	69 408	79 819	39 910	3 991	23 946	27
Zone3	63 370	72 876	36 438	3 644	21 863	27
Zone4	39 230	45 115	22 557	2 256	13 534	27
Zone5	33 196	38 175	19 088	1 909	11 453	27

Concernant la dernière colonne, nous allons commencer nos simulations, au niveau du pilotage, avec une surface de capteur de 100 m², si nous remarquons que cette surface est insuffisante afin de réaliser le pilotage comme nous le souhaitons, c'est là que nous allons prendre 115 m² de capteur. Nous rappelons que le pilotage est réalisé afin de lisser les pics de consommation et non de répondre totalement à la consommation.

Ensuite, nous avons effectué différentes simulations au niveau de l'Outil de production pour nous permettre d'estimer combien de surface de PV, il faudrait installer sur la zone afin de répondre à la demande selon le scénario choisi.

Tableau 4.42 : Surfaces requises pour atteindre les objectifs des scénarios par zone à Mayotte [m²]

Consommation 2016 par zone [MWh]		Surface nécessaire de PV [m ²]							
		100% EnR	% par rapport superficie de la zone	50% EnR	% par rapport superficie de la zone	5% EnR	% par rapport superficie de la zone	30% EnR	% par rapport superficie de la zone
Zone1	96 567	475 000	0,59%	240 000	0,30%	23 700	0,03%	143 000	0,18%
Zone2	69 408	341 000	0,39%	171 000	0,2%	17 100	0,02%	102 500	0,12%
Zone3	63 370	312 000	0,32%	156 000	0,16%	15 700	0,016%	94 000	0,1%
Zone4	39 230	193 000	0,19%	97 000	0,1%	9 700	0,01	58 000	0,06%
Zone5	33 196	165 000	1,5%	85 000	0,77%	8 200	0,075	49 000	0,45%

4.3 - SYSTÈME DE PILOTAGE DE LA DISTRIBUTION D'EnR SUR LE TERRITOIRE MAHORAIS

4.3.1 - Outil de pilotage de la distribution d'énergie électrique

Le pilotage de la distribution de l'énergie électrique nécessite de disposer au préalable des données de consommation et de production électrique au pas de temps horaire sur une année complète. Concernant les données de production électrique, nous nous basons uniquement sur la production issue des EnR et plus précisément du photovoltaïque au niveau du territoire mahorais. Et pour les données de consommation horaire, nous nous sommes basés sur des données horaires sur une année complète de ceux du département français voisin de Mayotte se situant sur le même air géographique de l'océan Indien, qui est La Réunion, en l'absence de données horaires sur le département de Mayotte.

4.3.2 - Rappel sur l'outil de pilotage et les problématiques pour un système d'espace bâti (SEB)

An niveau du chapitre III où nous avons étudié un système d'Eco Ferme, un Outil de pilotage entre consommation et production de l'énergie électrique a été développé. Nous rappelons ci-dessous ces principales caractéristiques.

4.3.2.1 - Dispositif de distribution

Le travail mené au niveau de l'Eco Ferme a permis de définir un système de gestion de la distribution électrique sur le site. La distribution est réalisée selon le schéma de la Figure 4.37 ci-dessous.

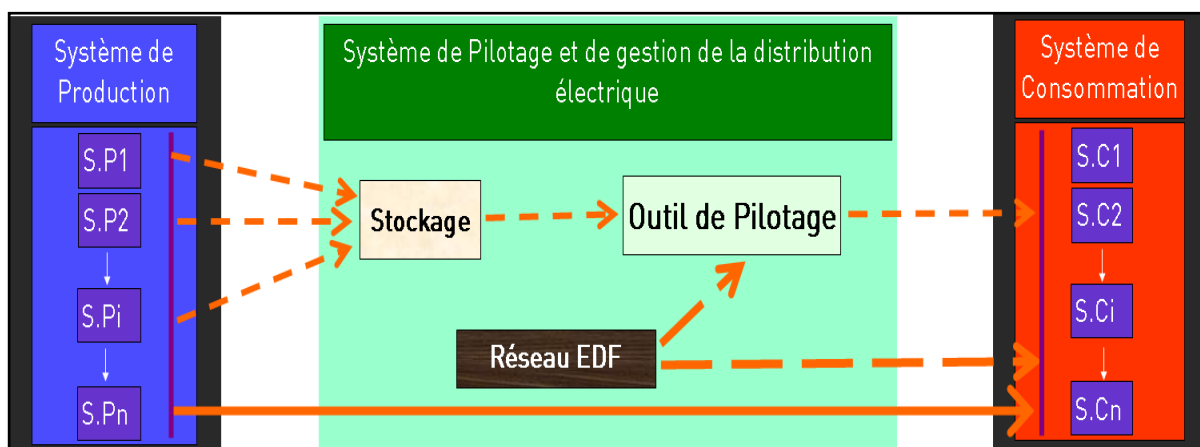


Figure 4.37 : Principe de gestion de la distribution électrique sur système d'espace bâti

Sur cette Figure 4.37, nous observons que la distribution s'effectue en associant un fichier provenant d'un système de production électrique à partir d'EnR pour répondre aux besoins de production en cas de pic des systèmes de consommation électrique. Il existe un système de pilotage qui permet de réaliser la gestion entre la production et la consommation électrique sur le site. Le réseau EDF est sollicité mais pas toujours nécessairement, en effet nous avons définis des seuils d'appel réseau.

4.3.2.1. 1 - Système de production

Le système de production de la Figure 4.37 représente un système où il a été développé des fichiers qui permettent de simuler la production électrique d'origine EnR au pas de temps horaire. La Figure 4.37 montre qu'il peut y avoir plusieurs sites de production électrique provenant de différentes sources.

4.3.2.1. 2 - Système de consommation

Le système de consommation de la Figure 4.37 représente un système qui simule la consommation électrique de différents espaces bâtis situés sur l'Eco Ferme. Les besoins électriques du système de consommation sont assurés soit par les EnR lorsque les dispositifs installés sur le site arrivent à répondre aux besoins après avoir stocké une quantité seuil définie au préalable. Soit, nous faisons appelle au réseau EDF pour répondre à la consommation lorsque la production EnR est insuffisante ou lorsque les seuils définis sont atteints.

4.3.2.1. 3 - Stockage

Le stockage est utilisé pour pallier aux fluctuations de puissance à court ou moyen terme sur le site d'étude. Nous avons fait le choix d'utiliser des batteries solaires avec régulateur solaire sur le site. Au niveau du régulateur de l'Eco Ferme, nous avons régulé la charge de la batterie, qui ne doit pas dépasser 80%, ni ne doit descendre sous les 50% de décharge. En effet, une surcharge comme une décharge trop profonde endommage rapidement les batteries et diminue sensiblement leur durée de vie, or c'est des dispositifs qui présentent un coût important. Pour le stockage, nous allons faire le choix de partir sur une batterie de stockage comme au niveau du chapitre 3, c'est-à-dire une batterie Gel 12V-200Ah auquel nous allons augmenter la tension pour arriver à 40V. Au final, c'est un lot (quatre batteries Gel 12V-200Ah montées en série) de batterie Gel 48V-200Ah.

4.3.2.1. 4 - Réseau

Le réseau, qui représente le réseau EDF, peut être sollicité pour répondre au besoin de consommation du site en cas de défaillance des systèmes EnR pour répondre au besoin.

4.3.2.1. 5 - Outil développé

L'Outil développé permet de faire l'analyse entre la consommation totale du site et la production des systèmes EnR installés sur le site au pas de temps horaire. Sur l'Outil, l'utilisateur doit renseigner les capacités de stockage, c'est-à-dire la capacité de stockage de la limite haute et la capacité de stockage de la limite basse ainsi que la surface des systèmes de production électrique d'origine EnR. La Figure 4.38 ci-dessous donne des renseignements à ce propos.

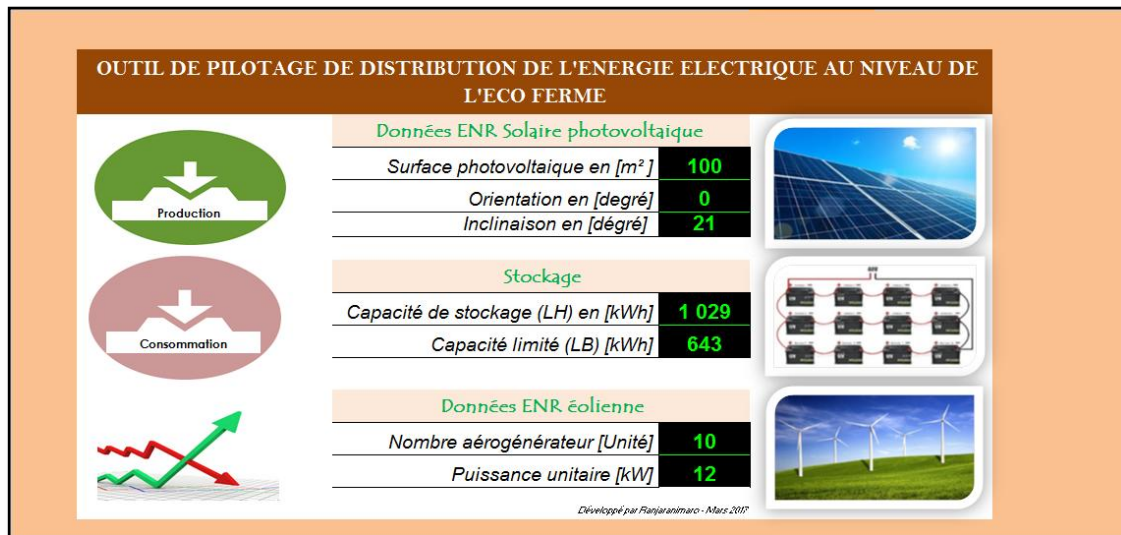


Figure 4.38 : Page d'accueil Outil de pilotage site "Eco ferme"

4.3.2. 2 - Scénario de distribution

4.3.2.2. 1 - Capacité de stockage

Différents scénarios ont été établis pour la gestion de la production électrique à partir d'EnR :

- $Production_{EnR} \ll$ Consommation électrique \rightarrow Consommation directe de la production EnR. Dans ce cas le pilotage n'est juste pas nécessaire.
- $Production_{EnR} \gg$ Consommation électrique \rightarrow Injection directe sur le réseau ou consommation directe ou stockage
- $Production_{EnR} =$ Consommation électrique \rightarrow trois cas possibles
 - Problème d'ajustement des surfaces des capteurs;
 - Problème d'ajustement des capacités de stockage;
 - Problème d'ajustement des limites hautes et basses du stockage.

4.3.2.2. 2 - Limite haute

Nous avons vu que la charge de la batterie ne doit pas dépasser 80%. En effet, une surcharge comme une décharge trop profonde endommage les batteries et diminue sensiblement leur durée de vie. Nous avons dit que le système de stockage possède les caractéristiques suivantes : 48V-200Ah.

En utilisant l'équation 6 du chapitre 3, nous avons trouvé une limite haute du système de stockage de l'Eco Ferme de 1 029 kWh.

4.3.2.2. 3 - Limite basse

Nous avons vu que la décharge de la batterie ne doit pas descendre sous les 50%. En effet, une surcharge comme une décharge trop profonde endommage les batteries et diminue sensiblement leur durée de vie. Nous avons dit le système de stockage possède les caractéristiques suivantes : 48V-200Ah.

En utilisant l'équation 7 du chapitre 3, nous avons trouvé une limite basse du système de stockage de l'Eco Ferme de 643 kWh.

4.3.2. 3 - Fichiers de pilotage

Pour le cas de l'ÉcoFerme, nous avons trouvé les graphiques suivants au niveau du fichier de pilotage.

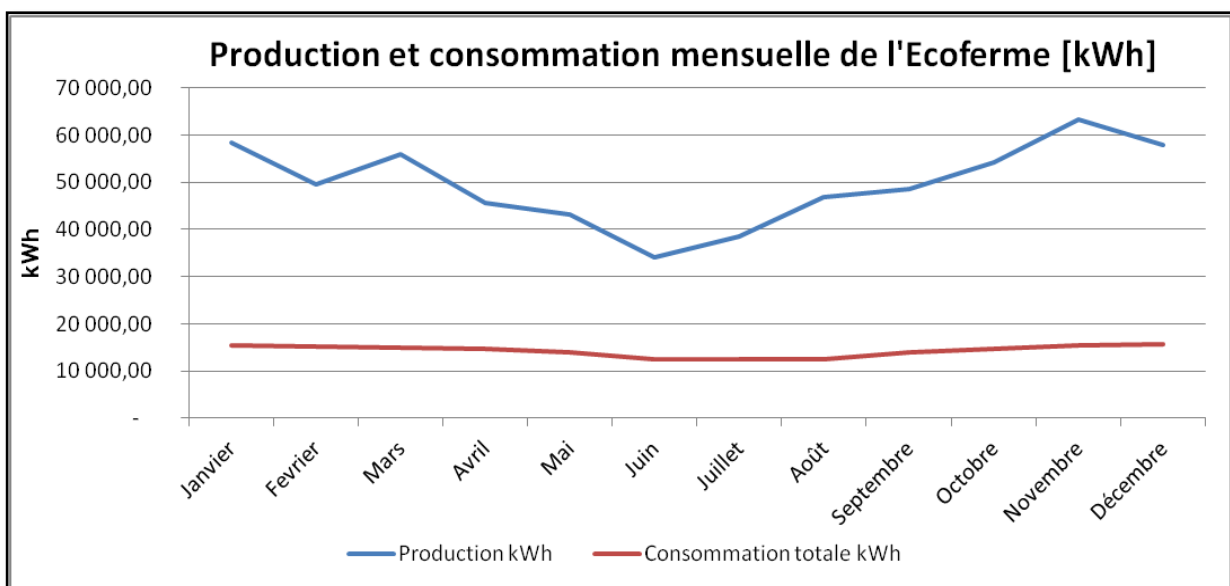


Figure 4.39 : Sortie graphique du pilotage sur l'ÉcoFerme

Nous observons qu'au niveau de l'Eco Ferme, la production des systèmes EnR installés arrive à répondre en totalité à la consommation sur la totalité de l'année.

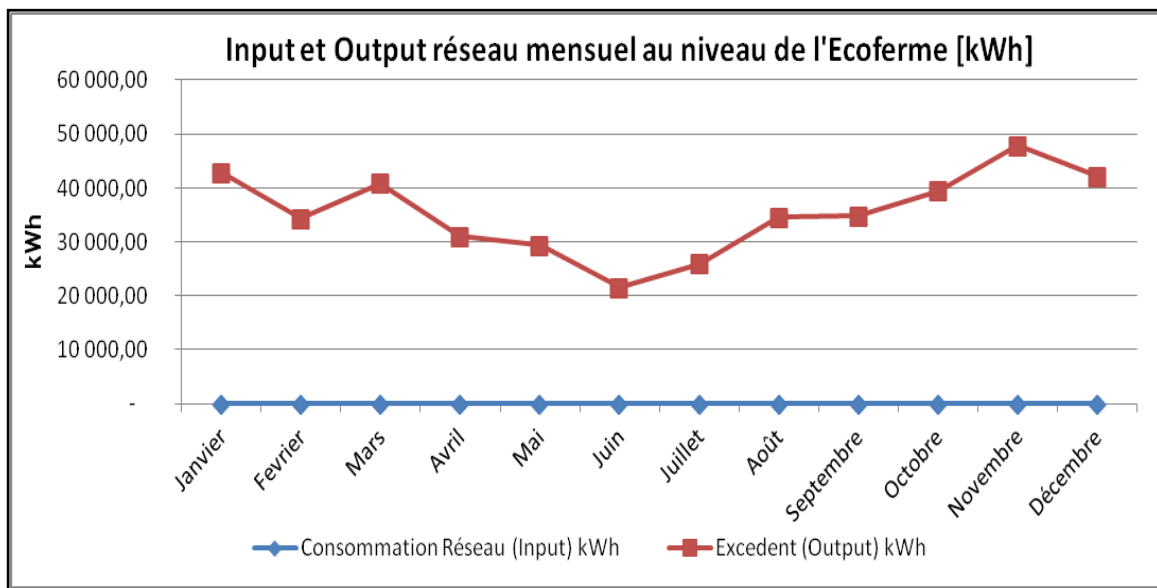


Figure 4.40 : Sortie graphique des Inputs et Outputs de l'Eco Ferme

4.3. 3 - Adaptation de l'outil de pilotage de la distribution de l'énergie à l'échelle d'un territoire

Dans cette section, le travail consiste à mettre en œuvre un outil de pilotage sur le territoire de Mayotte en se basant sur le travail effectué au niveau de l'Eco Ferme. Nous avons vu précédemment que pour pouvoir mettre en place un Outil de pilotage sur le territoire de Mayotte, il faudra avoir :

- Un Outil d'évaluation de la consommation électrique au pas de temps horaire du département de Mayotte;
- Un Outil d'évaluation de la production électrique d'origine renouvelable au pas de temps horaire du département de Mayotte.

Nous disposons d'une base de données météorologique horaire sur l'année pour l'évaluation de la production électrique d'origine EnR. En revanche, pour la consommation horaire sur Mayotte, nous ne disposons d'aucune base donnée. Cependant, nous avons pu mettre en place une méthode présentée dans les sections précédentes, et qui permet d'évaluer la consommation électrique horaire sur Mayotte en se basant sur une base de données EDF pour le département de la Réunion.

4.3.3. 1 - Dispositif de distribution

En s'inspirant du dispositif de distribution au niveau de l'Eco Ferme, on a mis en place un dispositif de distribution au niveau du département de Mayotte. La distribution est réalisée selon le schéma ci-dessous.

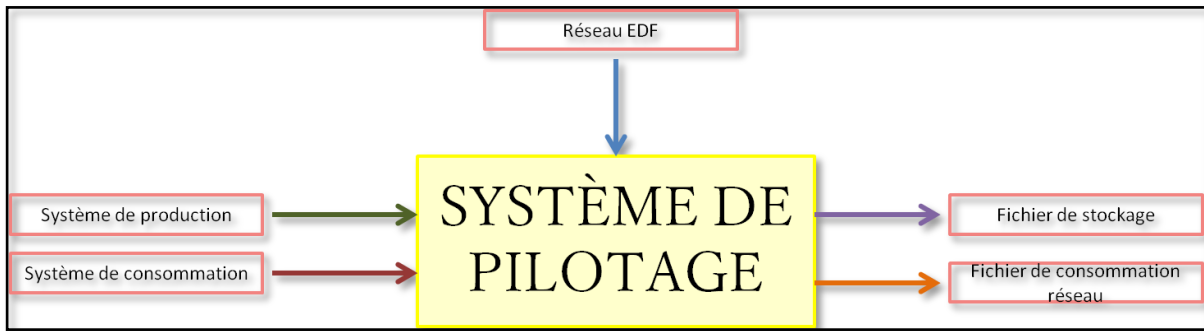


Figure 4.41 : Représentation simplifiée du dispositif de distribution électrique mise au point sur Mayotte

En développant cette Figure 4.41, nous avons établi la Figure 4.42 ci-dessous.

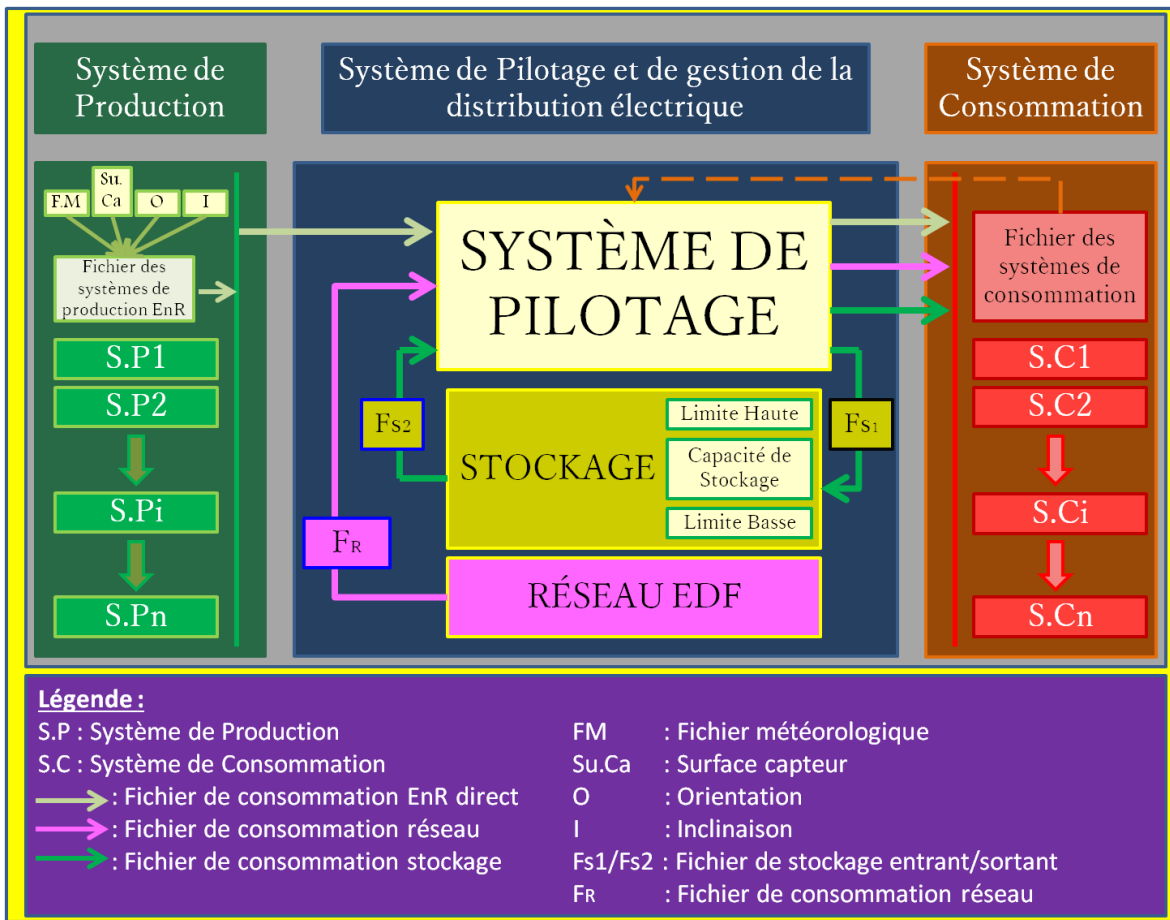


Figure 4.42 : Principe de gestion de la distribution électrique sur un territoire

Sur cette Figure 4.42, nous observons que le système de pilotage prend en charge la gestion des fichiers de production, stockage, réseau et consommation: c'est le noyau centralisateur de l'ensemble des données. Ensuite il affecte selon les besoins de consommation la quantité d'énergie demandée.

4.3.3.1. 1 - Système de production

Le système de production développé au sein du territoire de Mayotte se concentre exclusivement sur la production photovoltaïque. En effet, afin de ne pas détériorer le paysage ni

l'environnement naturel de l'île, le choix de la production électrique d'origine renouvelable se porte que sur les panneaux photovoltaïques, en raison de la position géographique de l'île proche de l'équateur qui lui permet de bénéficier d'un bon ensoleillement tout au long de l'année. Le système de production s'appuie sur un fichier météorologique du site de Pamandzi près de l'aéroport afin d'effectuer les simulations.

4.3.3.1. 2 - Système de consommation

En raison de l'absence totale de données se rapportant à la consommation horaire sur le territoire de Mayotte, le système de consommation développé au niveau du territoire de Mayotte s'appuie sur des données de production horaire électrique. En effet, il est communément connu que la production répond à une demande de consommation de la population. Cette hypothèse est logique et reste le seul moyen que nous avons pu trouver afin d'évaluer la consommation horaire sur le territoire de Mayotte. Ces données de production horaire concernent le territoire de La Réunion. Nous énumérons dans les sections ci-dessous les étapes qui ont permis de ressortir l'évaluation de la consommation électrique horaire sur Mayotte en s'appuyant sur les données de production horaire de La Réunion.

4.3.3.1. 3 - Stockage

Nous faisons le choix pour le territoire de Mayotte de s'appuyer sur les batteries solaires afin de réaliser le stockage de l'énergie électrique qui serait en surplus comme au niveau de l'Eco Ferme. Au niveau du régulateur, nous allons réguler la charge de la batterie, qui ne doit pas dépasser 80%, ni ne doit descendre sous les 50% de décharge. En effet, une surcharge comme une décharge trop profonde endommage les batteries et diminue sensiblement leur durée de vie.

L'équation 6 et l'équation 7 qui sont données au niveau de l'Eco Ferme vont être utilisées afin de calculer les limites hautes et basses du système de stockage qui va être mis en place au niveau du territoire de Mayotte.

4.3.3.1. 4 - Réseau

Le réseau, qui représente le réseau EDM, peut-être sollicité afin de répondre au besoin de consommation du territoire si la production n'arrive plus à répondre aux besoins de consommation de la population.

4.3.3.1. 5 - Outil développé

L'outil développé permet de faire l'analyse entre la consommation totale du territoire et la production des systèmes EnR installés sur le territoire au pas de temps horaire. Sur l'outil, l'utilisateur doit renseigner les capacités de stockage, c'est-à-dire la capacité de stockage de la limite haute et la capacité de stockage de la limite basse, ainsi que la surface des systèmes de production électrique d'origine EnR comme indiqué au niveau de la Figure 4.43 ci-dessous.

Données ENR Solaire photovoltaïque	
Surface photovoltaïque en [m ²]	
Orientation en [degré]	
Inclinaison en [degré]	

Stockage	
Capacité de stockage (LH) en [kWh]	
Capacité limité (LB) [kWh]	

Figure 4.43 : Page d'accueil outil de pilotage du territoire de Mayotte

4.3.3. 2 - Scénario de distribution

4.3.3.2. 1 - Dimensionnement des systèmes de production

Pour le Département de Mayotte, le dimensionnement des systèmes de production pour chaque zone est réalisé en se basant sur la journée où la consommation électrique a été la plus élevée, c'est à dire sur la journée du 03 mars. Nous allons présenter sur ce manuscrit les résultats de la zone 5. Pour rappel, le système de production sera optimisé lorsque nous allons avoir la courbe de production électrique moyenne journalière qui sera juxtaposé par le bas avec la courbe de consommation électrique moyenne journalière. Nous avons débuté notre simulation avec une surface de capteur de 100 000 m² pour la zone 5.

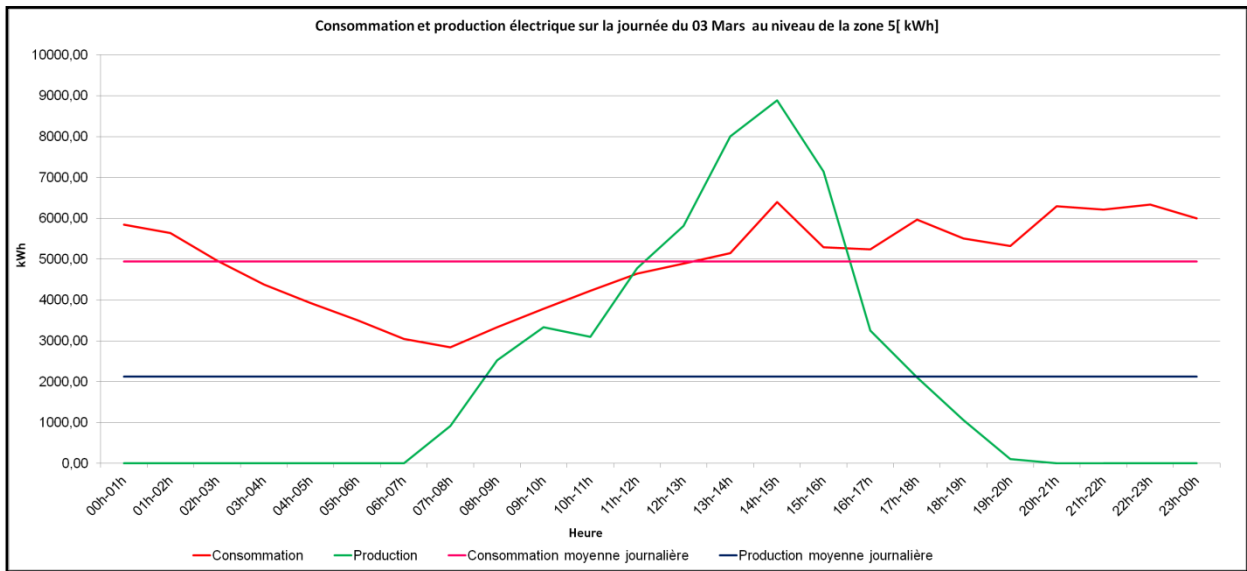


Figure 4.44 : Résultats des simulations sur la journée du 03 mars [100 000 m² de capteur PV]

Nous observons sur cette Figure 4.44 que la courbe de production électrique moyenne journalière est encore trop décalée par rapport à la courbe de consommation moyenne journalière. Afin de pouvoir rapprocher ces deux courbes pour qu'elles se juxtaposent, nous allons augmenter la surface de capteur PV. Les résultats sont donnés sur la Figure 4.45.

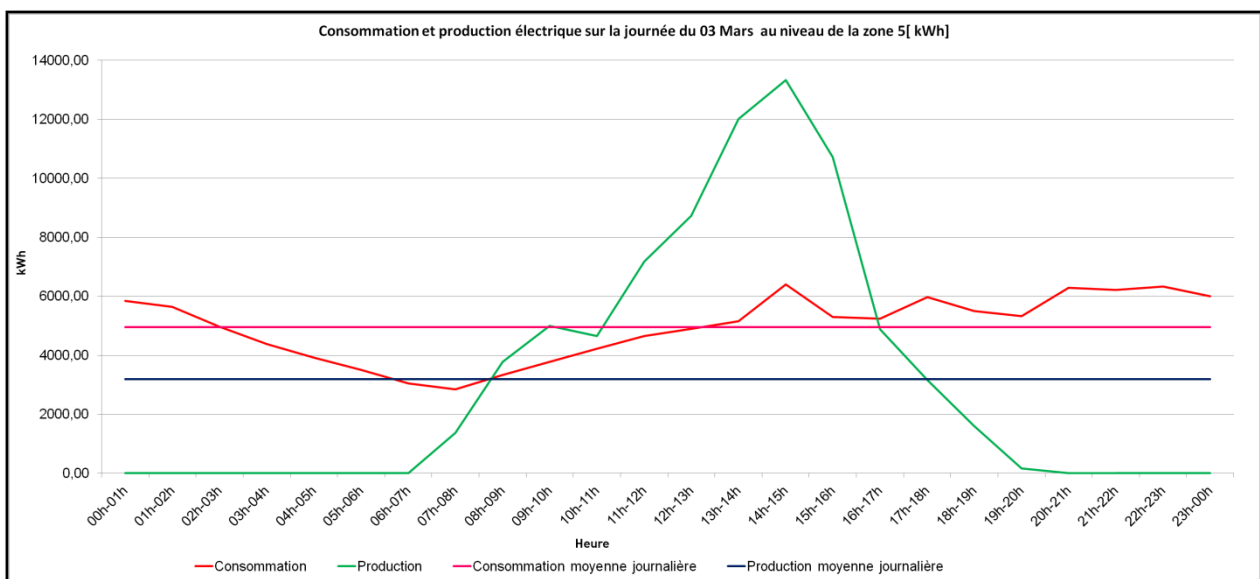


Figure 4.45 : Résultats des simulations sur la journée du 03 mars [150 000 m² de capteur PV]

Nous remarquons sur cette Figure 4.45 que la courbe de production électrique moyenne journalière ne se juxtapose pas avec la courbe de consommation électrique moyenne journalière. Elles se sont cependant rapprochées, pour être tout prêt l'un de l'autre par rapport à la Figure 4.44. Il faut donc continuer les simulations.

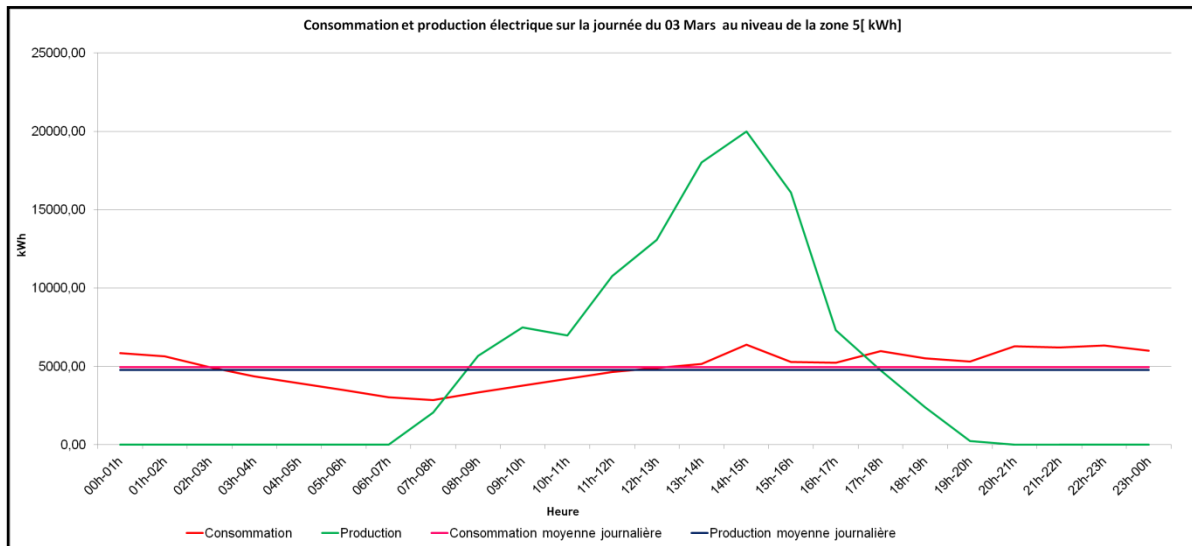


Figure 4.46 : Résultats des simulations sur la journée du 03 mars [225 000 m² de capteur PV]

Nous constatons sur cette que les courbes de consommation et de production moyennes journalières se juxtaposent. La valeur optimale trouvée pour ce type de système est de 225 000 m² de capteurs pour la zone 5. Ensuite, nous avons souhaité mener des simulations sur un mois intermédiaire et un mois d'hiver austral avec les données optimisées afin d'avoir une idée sur la manière dont les systèmes se comportent. Les résultats sont présentés sur les deux figures suivantes.

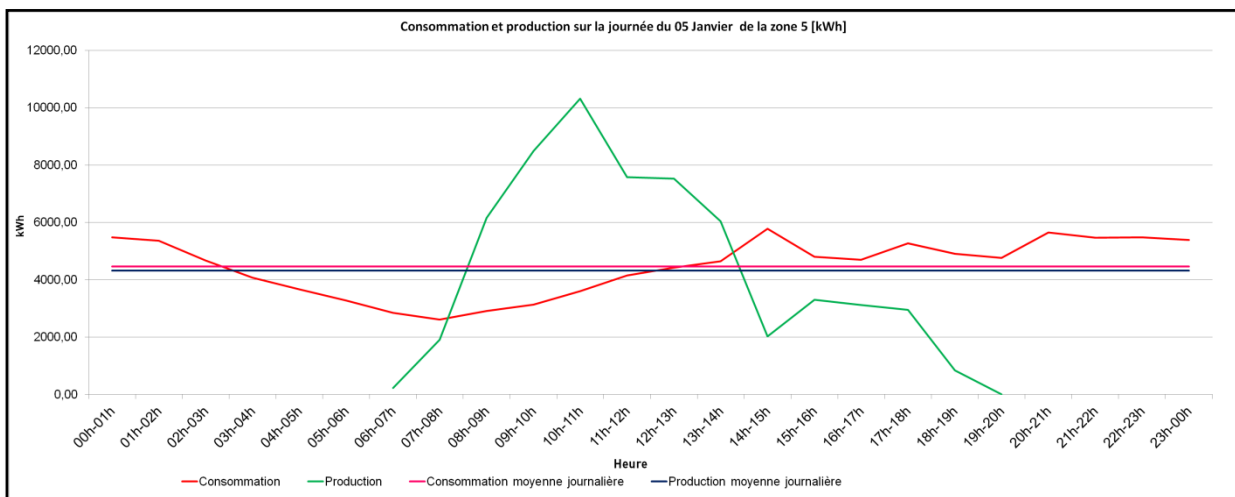


Figure 4.47 : Résultats des simulations sur la journée du 05 janvier [225 000 m² de capteur PV]

Sur cette Figure 4.47, nous constatons, sur ce jour précis d'un mois intermédiaire, que la production moyenne journalière est légèrement inférieure à la courbe de consommation moyenne journalière. Cela peut-être expliqué par le faible ensoleillement de ce jour précis. Nous allons à présent visualiser les résultats pour un mois d'hiver austral.

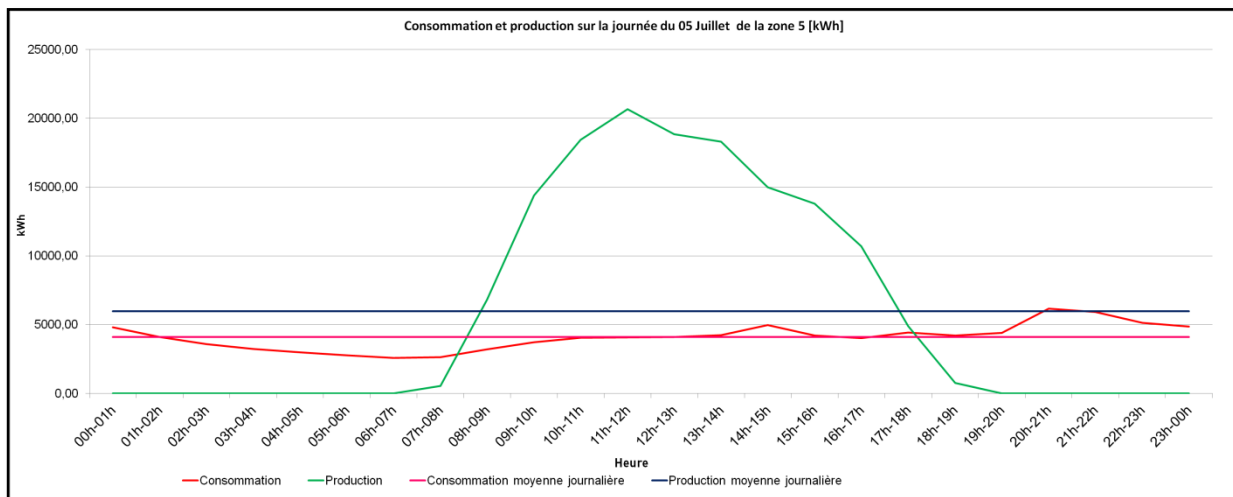


Figure 4.48 : Résultats des simulations sur la journée du 05 juillet [225 000 m² de capteur PV]

Sur cette Figure 4.48, nous remarquons que sur ce jour précis la courbe de production moyenne journalière est supérieure à la courbe de consommation moyenne journalière. Ceci peut-être expliqué par l'ensoleillement reçu pendant cette journée d'hiver austral.

Nous remarquons que selon l'ensoleillement, la production peut se situer soit au-dessus ou en-dessous de la consommation. Afin de pouvoir répondre, à la demande pour pouvoir lisser les pics de consommation électrique, il nous faut installer un système de stockage électrique qui peut stocker les excédents de production pour les restitués sur les périodes de manques de production en vue de lisser de pic de consommation électrique.

4.3.3.2. 2 - Dimensionnement de la capacité de stockage

Différents scénarios ont été établis pour la gestion de la production électrique à partir d'EnR :

- $Production_{EnR} \ll Consommation\ électrique \rightarrow$ Consommation directe de la production EnR. Dans ce cas le pilotage n'est juste pas nécessaire;
- $Production_{EnR} \gg Consommation\ électrique \rightarrow$ Injection directe sur le réseau ou consommation directe ou stockage :
- $Production_{EnR} = Consommation\ électrique \rightarrow$ trois cas possibles :
 - Problème d'ajustement des surfaces des capteurs;
 - Problème d'ajustement des capacités de stockage;
 - Problème d'ajustement des limites hautes et basses du stockage.

Nous avons simulés l'installation de panneaux photovoltaïques au niveau des différentes zones, avec des capteurs dont la puissance crête unitaire est de 230 Wc comme pour l'Eco Ferme. Cependant pour le dimensionnement de la capacité de stockage, nous allons maintenant prendre une surface de 100m² de PV pour chaque zone. Par ailleurs, même pour une surface installée de 100 m², nous allons avoir une puissance crête qui va être au delà de 1600 Wc pour chaque zone. Par voie de conséquence, nous allons nécessairement prendre un système de stockage avec une tension de 48V d'après Tableau 3.32.

Nous avons fait le choix de prendre comme batterie de base, des batteries Gel 12V-200Ah au prix unitaire de 399€ ttc pour les raisons aussi annoncé au chapitre 3. Comme, nous voulons du 48V, nous allons monter quatre batteries en série pour obtenir un lot de batterie Gel 48V-200Ah.

Nous rappelons sur le tableau, les consommations électriques annuelles, ainsi que les consommations journalières associés pour chaque zone du département de Mayotte.

Tableau 4.43 : Consommation électrique annuelle et moyenne journalière des différentes zones sur Mayotte

Zone	Consommation électrique annuelle (évaluer en 2020) [kWh]	Consommation électrique moyenne journalière (évaluer en 2020) [kWh]	Consommation électrique moyenne journalière (évaluer en 2020) [Wh]
Zone1	107 189 000	294 000	294 000 000
Zone2	77 042 000	211 000	211 000 000
Zone3	70 343 000	193 000	193 000 000
Zone4	43 546 000	119 000	119 000 000
Zone5	36 846 000	101 000	101 000 000

Zone 1:

$$P[W] = \frac{E[Wh]}{t[s]} = \frac{294\,000\,000}{86400} = 3\,402,78 \text{ W} \quad (1)$$

$$I [A] = \frac{P[W]}{U[V]} = \frac{3402,78}{48} = 70,89 \text{ A} \quad (2)$$

$$1 \text{ jour} = 24\text{H} ; 70,89 / 24 = 2,96 \text{ Ah} ; 2,96 / 200 = 0,0148 = 1$$

Si nous optons pour une autonomie complète sur une journée, il semble après calcul que le lot de batterie type Gel 48V-200Ah peut assurer le stockage pour la zone1 (1 jour = 24H ; 70,89 / 24 = 2,96 Ah ; 2,96 / 200 = 0,0148 = 1). Dans notre cas d'étude, nous ne souhaitons que lisser les pics de consommation électrique lié à la zone1. Nous allons prendre un lot composé de quatre batteries montées en série afin d'avoir un lot de batterie Gel 48V-200Ah. À titre d'information, la consommation électrique maximum (énergie) estimée au niveau de la zone1 est de 18 800 kWh enregistré le 26 avril.

En utilisant les relations (1) et (2), nous avons :

$$P = 18\,800\,000 / 3600 = 5\,222,22 = 5\,222 \text{ [W]}$$

$$I = 5\,222 / 48 = 108,79 = 109 \text{ [A]}$$

Au vue de ces calculs, nous pouvons déduire qu'un système de stockage de batterie Gel 48V-200Ah sera largement suffisant pour répondre à notre problématique de lissage de pic de la courbe d'appel réseau pour la zone1. Étant donnée que c'est la zone 1 la plus grande en superficie, la plus peuplée et la plus consommatrice d'électricité, nous pouvons déduire qu' système de stockage de batterie Gel 48V-200Ah sera suffisant pour chaque zone.

Maintenant, nous allons vous présenter les résultats de simulation pour le système de stockage. Nous rappelons, qu'il nous faudrait au total 12 250 000 Ah soit environ 588 000 kWh de capacité de stockage afin de pouvoir répondre à la totalité de la consommation journalière. Cependant, nous ne souhaitons que juste lisser les pics de charge et non pas répondre à la totalité de la consommation électrique. Pour optimiser le système de stockage, nous allons effectuer des simulations jusqu'à ce que

la courbe de l'excédent devienne nulle. Nous avons commencé notre simulation avec une capacité de stockage de 50 000 kWh, les résultats sont donnés sur la Figure 4.49.

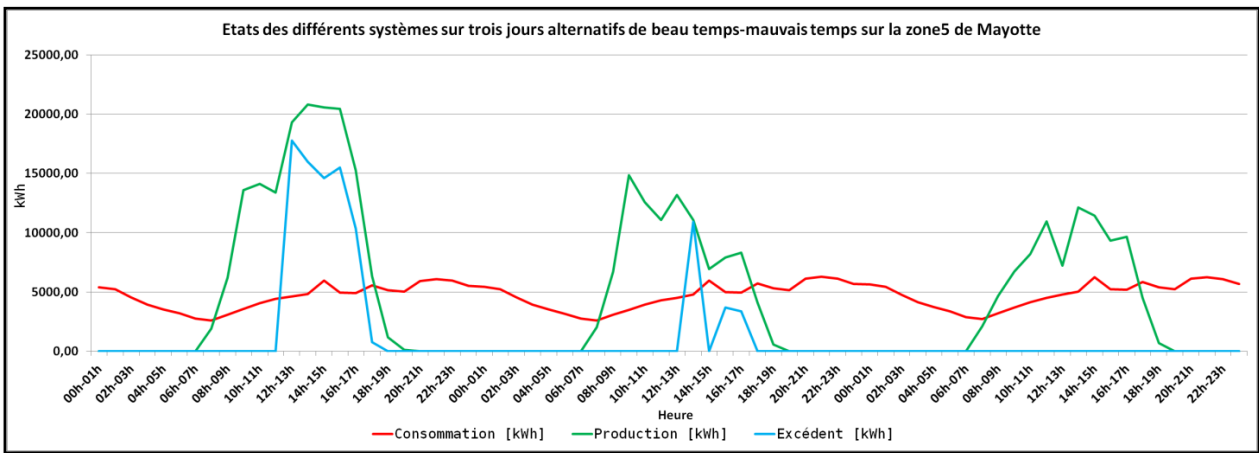


Figure 4.49 : États des différents systèmes sur 3 jours alternatifs de beau-temps et mauvais-temps sur la zone 5 avec une capacité de stockage de 50 000 kWh [kWh]

Sur cette Figure 4.49, nous remarquons qu'avec une capacité de stockage de 50 000 kWh, il y a beaucoup d'excédent. Nous allons donc augmenter cette capacité de stockage afin d'obtenir une valeur nulle au niveau de l'excédent.

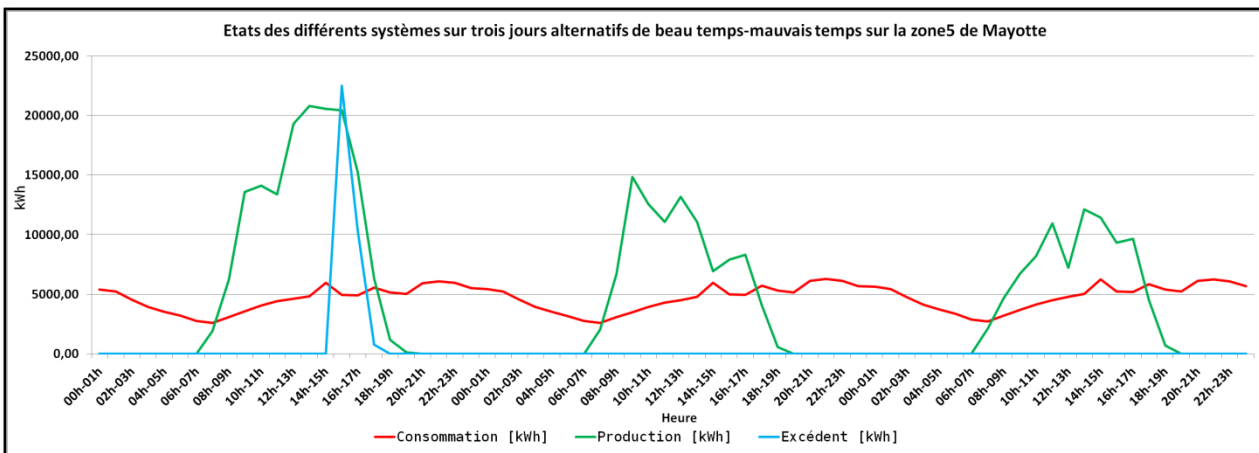


Figure 4.50 : États des différents systèmes sur 3 jours alternatifs de beau-temps et mauvais-temps sur la zone 5 avec une capacité de stockage de 100 000 kWh [kWh]

La Figure 4.50, nous permet d'observer qu'avec une capacité de 100 000 kWh, les pics d'excédent ont diminués mais pas disparus. Nous allons donc continuer les simulations.

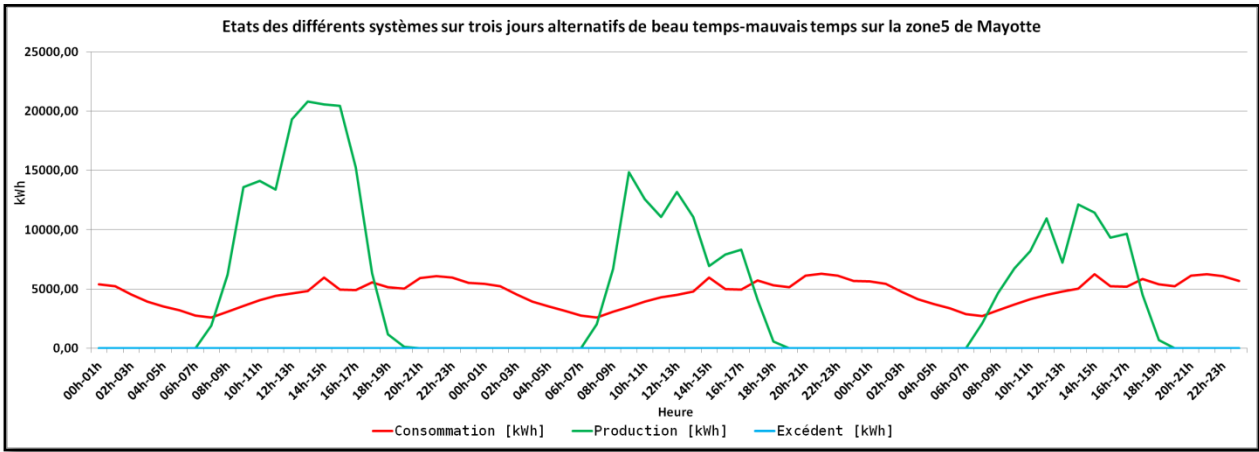


Figure 4.51 : États des différents systèmes sur 3 jours alternatifs de beau-temps et mauvais-temps sur la zone 5 avec une capacité de stockage de 113 660 kWh [kWh]

Nous constatons sur cette que la courbe de l'excédent est maintenant nulle, ce qui nous permet de conclure que nous avons trouvé les valeurs optimisées pour le système de stockage qui est de 113 600 kWh. Par rapport à la valeur d'origine qui était de 588 000 kWh, nous avons réalisé une baisse d'environ 81% sur la capacité de stockage.

Nous allons maintenant donner les résultats de simulations au niveau de l'appel au réseau électrique. Nous devons effectuer des simulations jusqu'à ce que l'appel au réseau électrique ne dépasse plus la valeur limite que nous avons fixé, à savoir 2 000 kWh. Nous avons débuté notre simulation en fixant la limite haute de stockage à 15 000 kWh, la limite basse du stockage à 1 000 kWh et la limite de l'appel réseau à 2 000 kWh. Sur ces simulations, nous allons faire varier que la valeur de la limite haute. Les résultats de simulation sont donnés ci-dessous.

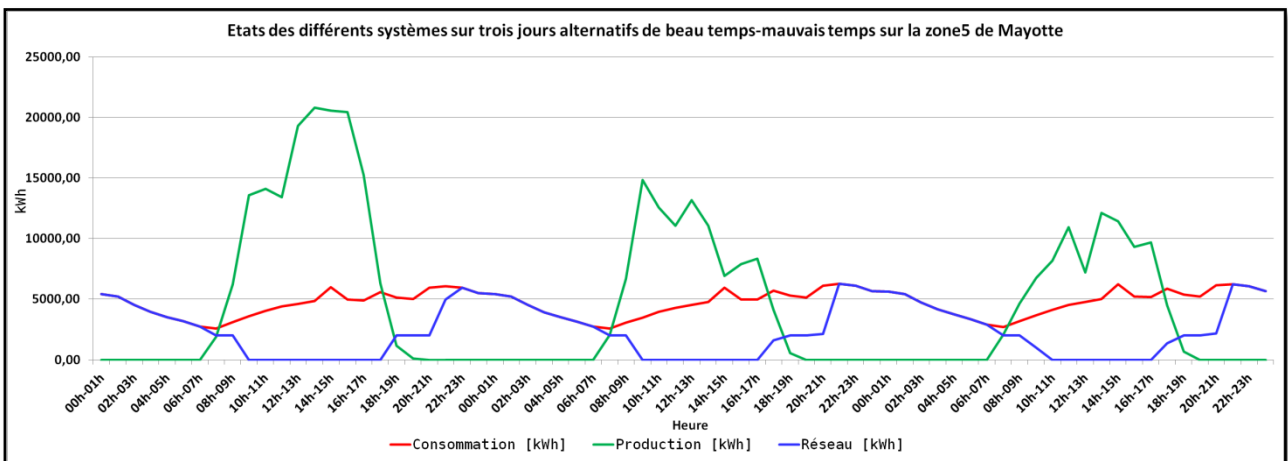


Figure 4.52 : États des différents systèmes sur 3 jours sur la zone 5 [Limite haute = 15 000 kWh]

Nous remarquons sur cette Figure 4.52 que la courbe d'appel au réseau commence à se lisser au niveau de 2000 kWh, mais la majeure partie n'est pas encore lissée. Nous avons donc décidé de passer à 30 000 kWh pour la limite haute. Les résultats sont donnés sur la Figure 4.53.

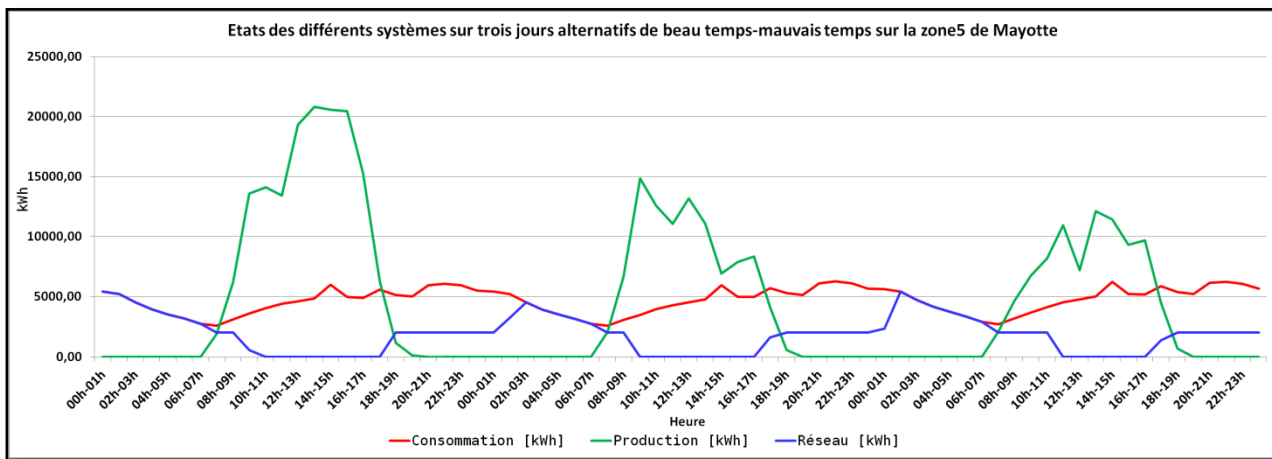


Figure 4.53 : États des différents systèmes sur 3 jours sur la zone 5 [Limite haute = 30 000 kWh]

Nous observons sur cette que la courbe d'appel au réseau commence à prendre un aspect plus représentatif de ce que nous souhaitons obtenir. Cependant, il reste encore des tranches horaires qui ne sont pas lissées. Nous allons donc continuer les simulations avec une valeur de 39 700 kWh pour la limite haute. Les résultats sont donnés sur la Figure 4.54.

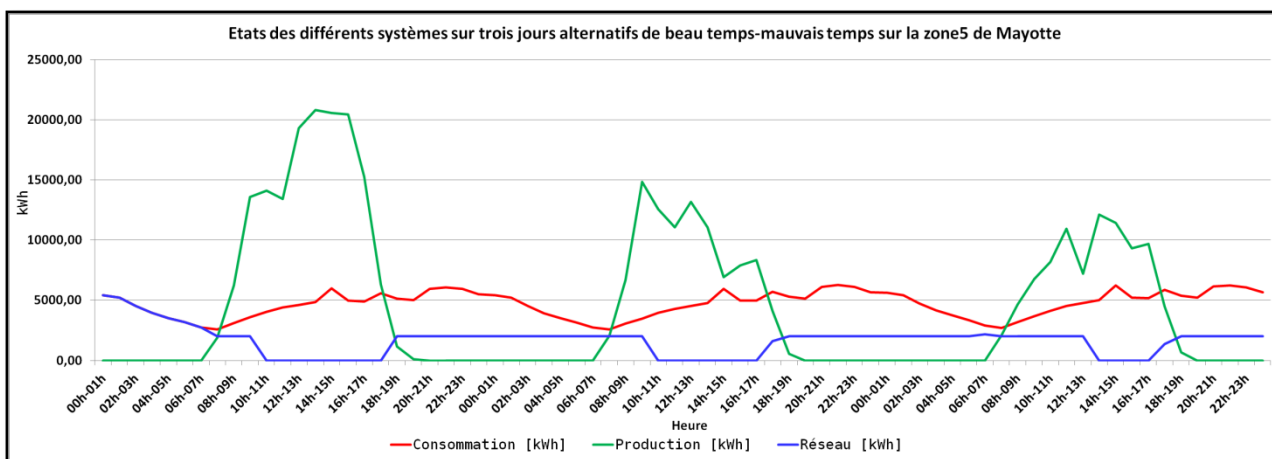


Figure 4.54 : États des différents systèmes sur 3 jours sur la zone 5 [Limite haute = 39 700 kWh]

Nous constatons sur cette Figure 4.54, que la courbe d'appel au réseau répond à nos attentes, c'est-à-dire pouvoir limité l'appel au réseau au maximum à 2 000 kWh. Ce résultat pour une limite haute de 39 700 kWh.

Nous donnons ci-dessous, les différentes valeurs de nos différents systèmes optimisés afin de répondre à nos objectifs de simulation concernant la zone 5 du département de Mayotte.

- Limite haute : 39 700 kWh
- Limite basse : 1 000 kWh
- Limite réseau : 2 000 kWh
- Capacité de stockage : 113 600 kWh
- 225 000 m² de surface de capteur photovoltaïque

4.3.3.2. 3 - Explicitation du dispositif de stockage

La zone1 possède une consommation électrique estimée de 107 189 000 kWh dans l'année. Nous avons opté pour une tension de 48V afin de minimiser le plus possible les déperditions. Le nombre de jour de réserve des batteries est fixé sur une journée. La profondeur de décharge maximum est fixée à 50%. Avec, la formule de la capacité de charge des batteries, nous sommes en mesure de déduire la capacité nominale du système de stockage.

$$C [Ah] = \frac{D \left[\frac{Wh}{j} \right] * N [j]}{L[\%] * U[V]}$$

Nous allons nous baser sur les besoins journaliers quotidiens afin de déterminer le nombre de batteries à installer. Les besoins quotidiens de la zone1 se situent environ à 294 000 000 Wh. En appliquant l'équation de la capacité de charge des batteries, nous obtenons :

$$C = \frac{294000000}{0,5 * 48} = 12\ 250\ 000\ Ah$$

Au niveau de la zone1, la capacité nominale du parc de batterie doit être de 12 250 000 Ah pour une autonomie sur une journée complète. Nous rappelons que nous ne voulons pas assurer une autonomie complète, mais simplement lisser les pics de consommation électrique.

À titre d'information, nous calculons le nombre de batterie qui permettra le stockage de l'énergie afin de pouvoir être autonome sur une journée.

$$\text{Nombre de batterie} = \frac{\text{Capacité de charge des batteries [Ah]}}{\text{Capacité totale ampère heure du système de stockage [Ah]}}$$

Pour la zone1, nous avons :

$$\frac{12\ 250\ 000}{200} = 61\ 250\ \text{batteries}$$

Si nous souhaitons assurer de manière optimale le stockage pour une autonomie complète durant une journée, au niveau de la zone1, il faudra au total 61 250 batteries. En raison de 399€ l'unité, cela représente un coup total de 24 438 750 € ttc pour le stockage. Mais nous avons répété à plusieurs fois, que ce qui nous intéresse c'est le lissage des pics de la courbe de charge. Du coup, nous estimons qu'un lot de batterie Gel 48V-200Ah est suffisant pour notre cas d'étude.

4. 4 - Synthèse du chapitre IV

Le pilotage au niveau des zones nécessite des surfaces dépassant les 50 000 m² de capteurs afin de pouvoir répondre adéquatement à notre problématique de lissage des pics des consommations électriques. Ce chiffre semble très élevé, mais par rapport à la superficie de la zone, cette valeur ne représente pas grand chose.

CONCLUSION GÉNÉRALE

«La somme de nos erreurs, nous mène à reconnaître les fausses pistes, et permet de nous converger vers la bonne piste!» Aristote

«L'esprit n'use de sa capacité créatrice que quand l'expérience lui impose la nécessité» Henri POINCARÉ

Les recherches que nous avons menées au cours de cette thèse nous ont permis d'apporter une contribution autour des objectifs que nous avons définis autour de nos travaux de recherche.

Nous avons pu cerner nos environnements d'études que sont les territoires insulaires de La Réunion et de Mayotte, de manière approfondie pour bien situer les problématiques et enjeux sur le plan énergétique. Les deux îles présentent des niveaux de développement très éloignés en termes de consommation énergétique. Les contextes sociologiques différents entraînent également des caractéristiques de consommation non comparables, notamment au niveau des profils de courbes de charge.

En matière de ressources énergétiques, les 2 îles ne possèdent pas les mêmes atouts dans la situation actuelle. Elles pourraient cependant à terme relever les mêmes défis autour des ressources solaires et aller à l'autonomie énergétique sur quasiment les mêmes bases. Notons malgré tout le faible potentiel éolien et hydraulique de Mayotte par rapport à La Réunion et les contextes éloignés en ce qui concerne les biomasses en raison du fort potentiel que constitue la bagasse à La Réunion suite à son évolution historique propre et des décisions politiques fermes prises à un moment donné.

Les démarches et outils que nous avons mis en œuvre dans le cadre de la thèse apportent dans un premier temps des bases de connaissances approfondies au niveau des systèmes de production d'EnR et des caractéristiques de consommation électrique dans les deux îles. Ces bases de connaissances devront cependant faire l'objet d'investigations mathématiques plus poussées pour assurer la fiabilité des informations et analyses mises en œuvre dans le cadre de cette thèse.

Les signatures énergétiques mises en évidence nous renseignent de manière précise sur les postes de consommations problématiques au niveau de l'espace bâti et de tous les sous-systèmes qui la composent.

Notre démarche dans le cadre des espaces bâtis nous permet également de générer des fichiers horaires de consommation électrique. Ces fichiers décrivent pour chaque jour la courbe de charge en lien avec les besoins de consommation d'un espace bâti observé. Il est au cœur de toute simulation de pilotage du soutirage réseau dans un système recourant aux énergies renouvelables.

Nous avons trouvé deux cadres d'application relativement distinctes concernant l'outil de pilotage de la distribution électrique. Rappelons que nous ne souhaitons pas directement intégrer sur un réseau électrique centralisé une production d'EnR. Nous ne souhaitons pas non plus nous situer dans le cadre d'une production EnR répondant à la consommation totale d'un lieu.

À La Réunion l'application a porté sur un quartier représentatif d'un mini-territoire pour développer notre stratégie de lissage des courbes de charge. C'est à cette échelle qu'il est intéressant de conduire nos investigations.

À Mayotte nous avons appliqué l'outil sur un mini territoire afin de dimensionner une ferme photovoltaïque de surface accessible associée à un dispositif de stockage de capacité également accessible.

En raison de la grande variabilité des données d'énergie incidente à l'échelle de l'année, nous atteignons en moyenne sur l'année un lissage qui ne présente que 30 % des objectifs pour les journées les plus défavorables mêmes si pour les jours les plus favorables nous atteignons un lissage représentant 80% du lissage en moyenne.

Pour mieux assurer nos objectifs, il faudra affiner les algorithmes autour des dimensionnements des dispositifs EnR et du stockage ainsi que les conditions du soutirage réseau pour ne soutirer qu'au-dessus d'une valeur moyenne qui sera variable selon les conditions météorologiques.

Il nous sera donc nécessaire d'intégrer une dimension prédictive dans nos démarches de simulation autour des paramètres météorologiques.

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 : Les trois piliers du Développement Durable	25
Figure 1.2 : La transition écologique.....	27
Figure 1.3 : La transition énergétique	29
Figure.1.4 : Répartition de la production d'énergie primaire dans le monde entre 1989 et 1998.....	31
Figure 1.5 : Émissions de CO ₂ par pays (MtCO ₂)	33
Figure 1.6 : Émissions de CO ₂ par habitant (tCO ₂)	33
Figure 1.7: Part de chaque produit énergétique importé et exporté par la France en 2015	35
Figure 1.8 : Évolution de la production d'énergie primaire entre 1970 et 2015 en France [Mtep]	35
Figure 1.9 : Part de chaque forme d'énergie dans le mix électrique de la France en 2015[24].....	36
Figure 1.10 : Évolution de la consommation d'énergie primaire par forme d'énergie [Mtep]	36
Figure 1.11 : Consommation d'énergie finale par forme d'énergie en France en 2015 [Mtep].....	37
Figure 1.12 : Évolution de la consommation finale énergétique par secteur [Mtep]	37
Figure 1.13 : Évolution de la consommation finale d'électricité par secteur	38
Figure 1.14 : Évolution des émissions de CO ₂ dues à la combustion d'énergie par secteur	39
Figure 1.15 : Évolution de la consommation d'énergie primaire de 2000 à 2015 [ktep]	42
Figure 1.16 : Répartition de la consommation d'énergie finale de 2000 à 2015 à la Réunion [ktep]	42
Figure 1.17 : Part de la consommation d'énergie fossile par secteur à La Réunion en 2015 [ktep].....	43
Figure 1.18 : Consommation électrique par type de client en 2015	43
Figure 1.19 : Évolution des consommations finales d'énergie de 2002 à 2011.....	46
Figure 1.20 : Répartition des parts des consommations finales d'énergie en 2011	47
Figure 1.21 : Évolution des consommations électriques à Mayotte de 2002 à 2011 [MWh]	48
Figure 1.22 : Les formes d'énergie	50
Figure 1.23 : Chaîne d'énergie.....	52
Figure 1.24 : Exemple d'approche système	53
Figure 1.25 : Représentation simplifiée de différentes sources d'énergie	54
Figure 1.26 : Exemple de système de production énergétique	55
Figure 1.27 : Exemple de système de consommation énergétique.....	55
Figure 1.28 : Exemple de système de distribution énergétique.....	56
Figure 1.29 : Système de transport énergétique	56
Figure 1.30 : Système de stockage énergétique	57
Figure 1.31 : Description des éléments conceptuels de notre étude.....	57

Figure 1.32 : Présentation des approches cartésienne vs systémique.....	59
Figure 1.33 : Les quatre concepts fondamentaux à l'étude des systèmes complexes.....	60
Figure 1.34 : Présentation de notre approche typologique.....	61
Figure 1.35 : Description des normes.....	62
Figure 1.36 : Les différentes phases de l'ACV selon les normes ISO (pour une entreprise)	63
Figure 2.1 : Description systémique en amont d'un espace bâti.....	67
Figure 2.2 : Description systémique en aval d'un espace bâti.....	67
Figure 2.3 : Approche typologique.....	68
Figure 2.4 : Organigramme du calcul horaire sur le mois.....	71
Figure 2.5 : Organigramme de calcul à l'échelle annuelle	72
Figure 2.6 : Organigramme de la méthodologie d'étude de l'impact énergétique d'un espace bâti.....	73
Figure 2.7 : Exemple courbe de charge des différents secteurs d'activité.....	76
Figure 2.8 : Exemple du principe de fonctionnement d'un système de production et du stockage ainsi que de l'optimisation du lissage de la courbe de charge.....	77
Figure 2.9 : Organigramme des fichiers horaires	78
Figure 2.10 : Étape de caractérisation d'un espace bâti et identification des bâtiments.....	79
Figure 2.11 : Étape de caractérisation d'un bâtiment et identification des espaces fonctionnels	80
Figure 2.12 : Étape de caractérisation d'un espace fonctionnel et identification des postes de consommation transversaux et spécifiques	80
Figure 2.13 : Étape de caractérisation d'un poste de consommation et identification des composants	80
Figure 2.14 : Étape de caractérisation d'un composant et acquisition des données	80
Figure 2.15 : Page générique de la page d'accueil de l'outil évolutif	81
Figure 2.16 : Page générique Système Espace Bâti	82
Figure 2.17 : Exemple de visualisation d'une page concrète d'un système d'espace bâti.....	83
Figure 2.18 : Page générique espace bâti	83
Figure 2.19 : Visualisation d'une page concrète d'un espace bâti	84
Figure 2.20 : Exemple page générique d'un bâtiment	84
Figure 2.21 : Visualisation d'une page concrète bâtiment.....	85
Figure 2.22 : Exemple page générique d'un espace fonctionnel	85
Figure 2.23 : Visualisation d'une page concrète Espace Fonctionnel	86
Figure 2.24 : Exemple page générique postes de consommation transversales	86
Figure 2.25 : Page générique poste de consommation spécifique.....	87
Figure 2.26 : Visualisation page concrète poste de consommation transversale	87
Figure 2.27 : Visualisation d'une page concrète poste de consommation spécifique.....	88
Figure 2.28 : Bandeau de navigation entre les pages de l'outil	88
Figure 2.29 : Affichage détaillée de la navigation du bandeau	89

Figure 2.30 : Bandeau de navigation vertical vers les résultats et analyses	91
Figure 2.31: Organigramme outil d'évaluation de la consommation annuelle énergétique au pas de temps horaire d'un poste de consommation.....	93
Figure 2.32 : Exemple de visualisation des pages d'évaluation de la consommation énergétique au pas de temps de l'heure	94
Figure 2.33 : Page d'accueil de l'outil d'évaluation de la production énergétique d'origine EnR.....	95
Figure 2.34 : Page présentation du projet et identification des EnR	95
Figure 2.35 : Présentation générale système PV	98
Figure 2.36 : Description détaillée du système de PV installé au niveau d'un espace bâti	98
Figure 2.37 : Présentation générale système Éolienne	104
Figure 2.38 : Description détaillée du système éolienne installé au niveau d'un espace bâti.....	104
Figure 2.39 : Illustration des différents systèmes à piloter.....	108
Figure 2.40 : Illustration du fichier de pilotage.....	108
Figure 2.41 : Schématisation de l'outil de pilotage énergétique.....	115
Figure 2.42 : Exemple de capacité de stockage et de limite d'appel réseau	118
Figure 3.1 : Consommation d'énergie primaire par habitant en 2011 [tep/hab].....	122
Figure 3.2 : Consommation électrique mensuelle des DOM sur 2016 [MWh].....	124
Figure 3.3 : Courbe de charge annuelle de la consommation électrique à La Réunion en 2016 [MWh]	124
Figure 3.4 : Courbe de charge de la consommation électrique journalière sur 2016 à la Réunion [MWh]	125
Figure 3.5 : Évolution de la consommation électrique de certaines communes réunionnaises de 2002 à 2016 [GWh].....	125
Figure 3.6 : Ratio de la consommation électrique communale selon la superficie [GWh/km ² /an].....	126
Figure 3.7 : Ratio de la consommation électrique communale par habitant [kWh/hab/an]	126
Figure 3.8: Localisation de l'Eco Ferme.....	127
Figure 3.9 : Schéma directeur Eco Ferme de Vincenzo avec ces différents espaces.....	127
Figure 3.10 : Plan 3D espace bâti Artisanal	131
Figure 3.11 : Plan 2D des bâtiments de l'espace bâti Artisanal	131
Figure 3.12 : Plan 2D bâtiment Atelier	133
Figure 3.13 : Plan 2D du bâtiment Exposition	Échelle : 1/1000 134
Figure 3.14 : Acquisition des données techniques et de durée d'utilisation journalière par composant	145
Figure 3.15 : Consommation électrique journalière par composant	146
Figure 3.16 : Acquisition de la durée d'utilisation mensuelle et du coefficient mensuel de pondération par composant	146

Figure 3.17 : Consommation mensuelle et annuelle par composant et par poste de consommation ...	147
Figure 3.18 : Représentation graphique des consommations journalières et annuelles	147
Figure 3.19 : Consommation totale journalière et annuelle d'un poste de consommation	148
Figure 3.20 : Résultats au niveau d'un espace fonctionnel.....	148
Figure 3.21 : Résultat au niveau d'un bâtiment	149
Figure 3.22 : Résultat au niveau d'un espace bâti	150
Figure 3.23 : Résultat de la consommation électrique d'une journée de Janvier sur l'Eco Ferme [kWh]	154
Figure 3.24 : Résultat de la consommation électrique sur une journée d'Avril sur l'Eco Ferme [kWh]	155
Figure 3.25 : Résultats de la consommation électrique sur une journée de juillet sur l'Eco Ferme [kWh]	155
Figure 3.26 : Résultat de la consommation électrique hebdomadaire selon les saisons sur l'Eco Ferme [kWh]	156
Figure 3.27 : Résultat de la consommation électrique mensuelle selon les saisons sur l'Eco Ferme [kWh]	157
Figure 3.28 : Résultat de la consommation électrique annuelle de l'Eco Ferme [kWh]	158
Figure 3.29 : Données techniques des PV installés sur l'Eco Ferme.....	161
Figure 3.30 : Données techniques des éoliennes installées sur l'Eco Ferme	166
Figure 3.31 : Exemple de courbe de production des EnR sur l'Eco Ferme sur une journée d'été et d'hiver [kWh].....	169
Figure 3.32 : Schéma simplifié du principe de gestion de la distribution électrique sur un système s'espace bâti.....	171
Figure 3.33 : Page d'accueil Outil de pilotage site "Eco Ferme".....	172
Figure 3.34 : États des systèmes sur la journée type favorable du 24 octobre	173
Figure 3.35 : États des systèmes sur la journée type moyenne du 02 août.....	173
Figure 3.36 : États des systèmes sur la journée type moyenne du 17 juillet	174
Figure 3.37 : Résultats des simulations sur la journée du 10 janvier [100 m ² de capteur PV et 10 éoliennes]	175
Figure 3.38 : Résultats des simulations sur la journée du 10 janvier [155 m ² de capteur PV et 10 éoliennes]	176
Figure 3.39 : Résultats des simulations sur la journée du 10 janvier [200 m ² de capteur PV et 10 éoliennes]	176
Figure 3.40 : Résultats simulation sur un mois intermédiaire avec les données optimales de la production [200 m ² de capteur PV et 10 éoliennes]	177

Figure 3.41 : Résultats simulation sur un mois d'hiver austral avec les données optimales de la production [200 m ² de capteur PV et 10 éoliennes]	177
Figure 3.42 : États des différents systèmes sur 3 journées-types (favorable, intermédiaire et défavorable) sur l'Eco Ferme avec une capacité de stockage de 250 kWh [kWh].....	180
Figure 3.43 : États des différents systèmes sur 3 journées-types (favorable, intermédiaire et défavorable) sur l'Eco Ferme avec une capacité de stockage de 290 kWh [kWh].....	180
Figure 3.44 : États des différents systèmes sur 3 journées-types (favorable, intermédiaire et défavorable) sur l'Eco Ferme avec une capacité de stockage de 298 kWh [kWh].....	181
Figure 3.45 : États des différents systèmes sur 3 journées-types (favorable, intermédiaire et défavorable) sur l'Eco Ferme [Limite haute = 100 kWh].....	182
Figure 3.46 : États des différents systèmes sur 3 journées-types (favorable, intermédiaire et défavorable) sur l'Eco Ferme [Limite haute = 200 kWh].....	182
Figure 3.47 : États des différents systèmes sur 3 journées-types (favorable, intermédiaire et défavorable) sur l'Eco Ferme [Limite haute = 284 kWh].....	183
Figure 4.1 : Présentation de Mayotte.....	189
Figure 4.2 : Consommations primaires à Mayotte en 2011 en pourcentage du total	190
Figure 4.3 : Consommation d'énergie finale par secteur en 2011	192
Figure 4.4 : Évolution de la production électrique à Mayotte de 2002 à 2014	195
Figure 4.5 : Profils de production électrique sur la journée type annuelle (La Réunion et Mayotte) ..	209
Figure 4.6 : Résultats de l'ACP effectué au niveau du Tableau 4.31: Graphe des variables.....	219
Figure 4.7 : Résultats de l'ACP effectué au niveau du Tableau 4.31 : Graphe des individus	220
Figure 4.8 : Courbe de charge journalière sur une semaine à La Réunion en MW.....	223
Figure 4.9 : Courbes de charge en septembre 2012 pour les différents jours de la semaine à Mayotte [MW][92]	224
Figure 4.10 : Courbes de charge hebdomadaire sur les semaines en Janvier à La Réunion [MWh] ...	225
Figure 4.11 : Consommations totales mensuelles en Janvier, Juillet et Octobre à La Réunion [MWh]	226
Figure 4.12 : Courbe de charge annuelle à La Réunion [MWh]	227
Figure 4.13 : Profil des consommations totales électriques mensuelles à Mayotte	232
Figure 4.14 : Consommation sur la journée du 27 janvier à Mayotte [MWh]	233
Figure 4.15 : Courbes de charge hebdomadaire sur les semaines en Janvier à Mayotte [MWh].....	234
Figure 4.16 : Consommations totales en Janvier, Juillet et Octobre pour Mayotte [MWh].....	234
Figure 4.17 : Consommation électrique annuelle pour Mayotte [MWh]	235
Figure 4.18 : Carte intercommunale de Mayotte.....	236
Figure 4.19 : Consommation journalière des zones sur Mayotte [MWh]	238
Figure 4.20 : Consommation hebdomadaire des différents systèmes à Mayotte [MWh]	239

Figure 4.21 : Consommation mensuelle en Janvier des différentes zones à Mayotte [MWh]	239
Figure 4.22 : Consommation annuelle des différentes zones à Mayotte [MWh]	240
Figure 4.23 : Consommation journalière des différentes zones sur Mayotte [MWh]	240
Figure 4.24 : Consommation hebdomadaire des différentes zones sur Mayotte [MWh]	241
Figure 4.25 : Consommation mensuelle des différentes zones sur Mayotte [MWh]	241
Figure 4.26 : Consommation annuelle des différentes zones sur Mayotte [MWh]	242
Figure 4.27 : Page d'acquisition de donnée de l'outil de production EnR sur Mayotte	246
Figure 4.28 : Production photovoltaïque sur la journée du 27 janvier à Mayotte pour 250 000 m ² de capteur [kWh]	247
Figure 4.29 : Production photovoltaïque sur la journée du 27 janvier à Mayotte pour 500 m ² de capteur [kWh]	247
Figure 4.30 : Production Photovoltaïque (S = 250 000 m ²) hebdomadaire en Janvier à Mayotte [kWh]	248
Figure 4.31 : Production Photovoltaïque (S = 500 m ²) hebdomadaire en Janvier à Mayotte [kWh]	248
Figure 4.32 : Production PV (S = 250 000 m ²) mensuelle à Mayotte [kWh]	249
Figure 4.33 : Production PV (S = 500 m ²) mensuelle à Mayotte [kWh]	249
Figure 4.34 : Production électrique annuelle PV (S = 250 000 m ²) à Mayotte [kWh]	250
Figure 4.35 : Production électrique annuelle PV (S = 500 m ²) à Mayotte [kWh]	250
Figure 4.36 : Récapitulatif de la production PV pour différentes systèmes sur Mayotte	256
Figure 4.37 : Principe de gestion de la distribution électrique sur système d'espace bâti	259
Figure 4.38 : Page d'accueil Outil de pilotage site "Eco ferme"	261
Figure 4.39 : Sortie graphique du pilotage sur l'ÉcoFerme	262
Figure 4.40 : Sortie graphique des Inputs et Outputs de l'Eco Ferme	263
Figure 4.41 : Représentation simplifiée du dispositif de distribution électrique mise au point sur Mayotte	264
Figure 4.42 : Principe de gestion de la distribution électrique sur un territoire	264
Figure 4.43 : Page d'accueil outil de pilotage du territoire de Mayotte	266
Figure 4.44 : Résultats des simulations sur la journée du 03 mars [100 000 m ² de capteur PV]	267
Figure 4.45 : Résultats des simulations sur la journée du 03 mars [150 000 m ² de capteur PV]	267
Figure 4.46 : Résultats des simulations sur la journée du 03 mars [225 000 m ² de capteur PV]	268
Figure 4.47 : Résultats des simulations sur la journée du 05 janvier [225 000 m ² de capteur PV]	268
Figure 4.48 : Résultats des simulations sur la journée du 05 juillet [225 000 m ² de capteur PV]	269
Figure 4.49 : États des différents systèmes sur 3 jours alternatifs de beau-temps et mauvais-temps sur la zone 5 avec une capacité de stockage de 50 000 kWh [kWh]	271
Figure 4.50 : États des différents systèmes sur 3 jours alternatifs de beau-temps et mauvais-temps sur la zone 5 avec une capacité de stockage de 100 000 kWh [kWh]	271

Figure 4.51 : États des différents systèmes sur 3 jours alternatifs de beau-temps et mauvais-temps sur la zone 5 avec une capacité de stockage de 113 660 kWh [kWh].....	272
Figure 4.52 : États des différents systèmes sur 3 jours sur la zone 5 [Limite haute = 15 000 kWh] ...	272
Figure 4.53 : États des différents systèmes sur 3 jours sur la zone 5 [Limite haute = 30 000 kWh] ...	273
Figure 4.54 : États des différents systèmes sur 3 jours sur la zone 5 [Limite haute = 39 700 kWh] ...	273

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Réserves mondiales d'énergies et production annuelle 2014 par sources d'énergie	32
Tableau 1.2 : Échanges énergétique de la France en 2015 [Mtep].....	34
Tableau 1.3 : Consommation électrique par secteur en 2015 [Mtep]	38
Tableau 1.4 : Production d'énergie primaire à la Réunion [ktep].....	40
Tableau 1.5 : Répartition de la production électrique à la Réunion en 2015 selon la source d'énergie .	41
Tableau 1.6 : Émissions des GES par secteur à La Réunion en 2015	44
Tableau 1.7 : Production d'énergie primaire à Mayotte [tep].....	45
Tableau 1.8 : Répartition de la production électrique à Mayotte en 2015 selon la source d'énergie	45
Tableau 1.9 : Consommation primaire en 2011 à Mayotte	46
Tableau 1.10 : Émissions des GES par secteur à Mayotte en 2011	48
Tableau 1.11 : Unité d'énergie.....	50
Tableau 1.12 : Processus de conversion d'une forme d'énergie à une autre	51
Tableau 2.1 : Facteurs d'influence par poste de consommation	90
Tableau 2.2 : Récapitulatif des coefficients de pondération par poste consommation dans l'année	91
Tableau 2.3 : Avantages et inconvénients des principaux modules photovoltaïques.....	97
Tableau 2.4 : Page d'acquisition des données techniques du système PV	99
Tableau 2.5 : Page d'acquisition des données météorologiques du site d'étude	101
Tableau 2.6 : Présentation des résultats sur la production EnR d'origine PV [kWh]	102
Tableau 2.7 : Avantages et inconvénients d'une éolienne	103
Tableau 2.8 : Page d'acquisition des données techniques du système éolienne	105
Tableau 2.9 : Page d'acquisition des données météorologiques du site d'étude	106
Tableau 2.10 : Présentation des résultats sur la production EnR d'origine éolienne [kWh]	106
Tableau 2.11 : Illustration d'un fichier de consommation (SCi)	116
Tableau 2.12 : Illustration d'un fichier de production (SPi).....	116
Tableau 2.13 : Illustration d'un fichier de stockage (STOi)	117
Tableau 2.14 : Illustration d'un fichier d'appel réseau (RESi).....	117
Tableau 2.15 : Illustration d'un fichier d'excédant de production (EXCi).....	118
Tableau 3.1 : Consommation énergétique en 2016 à la Réunion	121
Tableau 3.2 : Consommation d'énergie primaire annuelle par habitant en 2011 [tep/hab]	121
Tableau 3.3 : Consommation électrique estimée par commune à La Réunion de 2002 à 2016 [GWh]	123

Tableau 3.4 : Consommation annuelle d'électricité par habitant (kWh/habitant/an)	124
Tableau 3.5 : Présentation des postes de consommation des espaces fonctionnels du bâtiment Atelier	136
Tableau 3.6 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Accueil	136
Tableau 3.7 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Bureau	137
Tableau 3.8 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Atelier 1	137
Tableau 3.9 : Composants des postes de consommation spécifiques de l'espace fonctionnel Atelier 1	137
Tableau 3.10 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Atelier 2	138
Tableau 3.11 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Atelier 3	138
Tableau 3.12 : Composants des postes de consommation spécifiques de l'espace fonctionnel Atelier 3	138
Tableau 3.13 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Atelier 4	139
Tableau 3.14 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Varangue	139
Tableau 3.15 : Présentation des postes de consommation des espaces fonctionnels du bâtiment Exposition.....	140
Tableau 3.16 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Couloir	140
Tableau 3.17 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Salle d'exposition temporaire	141
Tableau 3.18 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel Salle d'exposition permanente.....	141
Tableau 3.19 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel W.C 1	141
Tableau 3.20 : Composants des postes de consommation transversaux de l'espace fonctionnel W.C 2	141
Tableau 3.21 : Les étapes de détermination de la consommation électrique journalière et annuelle, de son coût à l'année et du bilan carbone associé d'un espace bâti	142
Tableau 3.22 : Les espaces bâtis de l'Eco Ferme et les sous systèmes associés	151

Tableau 3.23 : Récapitulatif des données et résultats de l'Eco Ferme.....	153
Tableau 3.24 : Résultat consommation Eco Ferme heure par heure en Janvier [kWh]	158
Tableau 3.25 : Données météorologique mensuelle de Saint-Joseph.....	160
Tableau 3.26 : Récapitulatif des données et des résultats des PV de l'Eco Ferme	162
Tableau 3.27 : Exemple de fichier pour un mois complet.....	164
Tableau 3.28 : Exemple de fichier pour un mois complet sur la production éolienne de l'Eco Ferme [kWh]	168
Tableau 3.29 : Exemple tableau fichier de la production totale d'électricité d'origine EnR (PV + éolienne) en kWh	169
Tableau 3.30 : Récapitulatif des résultats au niveau de l'Eco Ferme	169
Tableau 3.31 : Récapitulatif des données par type de journée sur le site de l'Eco Ferme	172
Tableau 3.32 : Tension de batterie recommandée selon la puissance PV installée.....	178
Tableau 4.1 : Énergie totale consommée en 2011 (tep) dans les cinq DOM	191
Tableau 4.2 : Consommation énergétique en France continental et dans les DOM par secteur en 2011 [tep]	192
Tableau 4.3 : Production d'électricité à Mayotte de 2002 à 2014	194
Tableau 4.4 : Principales caractéristiques du PVCR à Mayotte entre 2008 et 2014	195
Tableau 4.5 : Échelle d'observation et types des données utilisées.....	200
Tableau 4.6 : Journée d'appel de la puissance maximale (MW) sur Mayotte de 2006 à 2014.....	201
Tableau 4.7 : Productions mensuelles d'électricité à Mayotte pour 2007, 2009, 2010 et 2011	202
Tableau 4.8 : Estimation des consommations électriques mensuelles de Mayotte en 2007, 2009, 2010 et 2011	202
Tableau 4.9 : Surface et Consommation d'électricité sur Mayotte par commune pour 2007, 2009, 2010 et 2011 [MWh]	203
Tableau 4.10 : Évolution du PIB, de la population, du PIB/Habitant et de la production électrique à Mayotte entre 2000 et 2014.....	204
Tableau 4.11 : Taux d'équipement de la population à Mayotte en 2002, 2007, 2011 et 2012	204
Tableau 4.12 : Évolution de la population entre 2011 et 2014 sur La Guyane, Mayotte, Métropole et La Réunion en milliers de personne	205
Tableau 4.13 : Évolution du PIB et du PIB par habitant entre 2011 et 2014 sur La Guyane, Mayotte, Métropole et La Réunion en milliers d'euros	205
Tableau 4.14 : Superficie des départements de La Guyane, Mayotte, Métropole et de La Réunion [km ²]	205
Tableau 4.15 : Consommation annuelle d'électricité [MWh].....	205
Tableau 4.16 : Consommation annuelle d'électricité par habitant en 2011 et 2014 [kWh/hab].....	206
Tableau 4.17 : Consommation annuelle d'électricité par secteur d'activité [MWh] en 2011 et 2014 ..	206

Tableau 4.18 : Tonne de fuels importés dans l'année (tep)	206
Tableau 4.19 : Puissance moyenne appelée sur le réseau à La Réunion en été et hiver [MW]	208
Tableau 4.20 : Production électrique 2009, 2010, 2011, 2015 et 2016 en MWh (Mayotte et Réunion)	210
Tableau 4.21 : Variation de la production électrique (Mayotte et Réunion).....	211
Tableau 4.22 : Évolution de la production et de la consommation électrique entre 2002 et 2014 sur Mayotte.....	212
Tableau 4.23 : Variations des consommations électriques sur Mayotte de 2007 à 2011	213
Tableau 4.24 : Données socio-économiques du département mahorais de 2000 à 2014	214
Tableau 4.25 : Croissance de la population à Mayotte entre 1997 et 2017	214
Tableau 4.26 : Consommation annuelle d'énergie par tonne de fuel importé (kWh/tep).....	215
Tableau 4.27 : Consommation annuelle d'énergie par PIB (kWh/PIB par habitant).....	215
Tableau 4.28 : Indice de la consommation électrique du secteur résidentiel	215
Tableau 4.29 : Indice de la consommation électrique du secteur industriel.....	215
Tableau 4.30 : Indice de la consommation électrique du secteur tertiaire	216
Tableau 4.31 : Principales caractéristiques socio-économico-énergétique des communes à Mayotte en 2012.....	217
Tableau 4.32 : Présence de données sur la consommation électrique annuelle par mois de 2009 à 2016	222
Tableau 4.33 : Rapport des consommations électriques horaires calculées entre La Réunion et Mayotte	231
Tableau 4.34 : Récapitulatif des résultats de Mayotte et des différentes zones en 2016 et 2020.....	243
Tableau 4.35 : Scénarios de la production électrique d'origine EnR définis sur Mayotte.....	244
Tableau 4.36 : Résultats des simulations de l'Outil sur la production EnR pour Mayotte	251
Tableau 4.37 : Résultats de simulation sur PVsyst pour Mayotte.....	252
Tableau 4.38 : Résultats de simulation sur PVGIS pour Mayotte.....	253
Tableau 4.39 : Récapitulatif de la production PV des différents systèmes pour Mayotte.....	255
Tableau 4.40 : Description détaillée des scénarios selon la zone du territoire pour 2016	257
Tableau 4.41 : Scénario de production majoré de 15%	258
Tableau 4.42 : Surfaces requises pour atteindre les objectifs des scénarios par zone à Mayotte [m ²].	258
Tableau 4.43 : Consommation électrique annuelle et moyenne journalière des différentes zones sur Mayotte.....	270

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. M. Huebner, J. Cooper, et K. Jones, « Domestic energy consumption—What role do comfort, habit, and knowledge about the heating system play? », *Energy Build.*, vol. 66, p. 626-636, nov. 2013.
- [2] T. Zhang, P.-O. Siebers, et U. Aickelin, « Modelling electricity consumption in office buildings: An agent based approach », *Energy Build.*, vol. 43, n° 10, p. 2882-2892, oct. 2011.
- [3] EDF, « Tarification électrique modulable proposée par EDF selon le type de client », 2004.
- [4] N.I Rakotonarivo, « Approche dynamique du bilan carbone de l'énergie consommée et de l'énergie grise dans un espace bâti », Phd Thesis, Université de La Réunion, 2013.
- [5] O. M. Vinkhuyzen et S. I. Karlsson-Vinkhuyzen, « The role of moral leadership for sustainable production and consumption », *J. Clean. Prod.*, vol. 63, p. 102-113, janv. 2014.
- [6] PNUE, « Cartographie : quel est l'impact des activités humaines sur la planète ? », *Science Actualités*. [En ligne]. Disponible sur: http://www.cite-sciences.fr/fr/ressources/science-actualites/detail/news/cartographie-quel-est-limpact-des-activites-humaines-sur-la-planete/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=2d4a4de9d684b047481b034d228d875c. [Consulté le: 03-juill-2017].
- [7] J-P Nicol, « Naissance et formation du concept de développement durable : une approche historique - L'encyclopédie du développement durable ». [En ligne]. Disponible sur: <http://encyclopedie-dd.org/encyclopedie/developpement-durable/1-1-de-l-eco-developpement-au/naissance-et-formation-du-concept.html>. [Consulté le: 03-juill-2017].
- [8] Collectif des associations citoyennes, « Les chemins de la transition écologique, sociale et culturelle ». 08-mars-2015.
- [9] « Scénario négaWatt 2017 | Le scénario ». [En ligne]. Disponible sur: <https://negawatt.org/scenario/methodologie>. [Consulté le: 22-janv-2018].
- [10] D. Dron, T. Francq, « Livre blanc sur le financement de la transition écologique : mobiliser les financements privés vers la transition écologique - Rapports publics - La Documentation française ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/134000773/index.shtml>. [Consulté le: 03-juill-2017].
- [11] O. Petitjean, « Comment le lobby nucléaire entrave toute transition énergétique », *Basta !* [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bastamag.net/Transition-energetique-une-loi-paralysee-par-le-lobby-nucleaire>. [Consulté le: 19-sept-2018].
- [12] « Après la sortie du nucléaire, l'Allemagne programme la sortie du charbon », *Révolution Énergétique*, 12-juin-2018. .
- [13] « Le nucléaire a-t-il sa place dans le mix décarboné de demain ? » [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bearingpoint.com/fr-fr/blogs/blog-energie/le-nucleaire-a-t-il-sa-place-dans-le-mix-decarboné-de-demain/>. [Consulté le: 19-sept-2018].
- [14] « Le bâtiment, premier poste de consommation d'énergie en France | L'énergie en questions ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lenergieenquestions.fr/le-batiment-premier-poste-de-consommation-denergie-en-france/>. [Consulté le: 03-juill-2017].
- [15] Union française de l'électricité, « Les enjeux de la transition énergétique ». .
- [16] « List of countries by total primary energy consumption and production », *Wikipedia*. 01-juin-2018.
- [17] British Petroleum, « BP Statistical Review of World Energy », *BPstats*, p. 48, Juin 2016.
- [18] « Impact des énergies fossiles : charbon, gaz, pétrole », *Protégeons la Terre*. .
- [19] « Émissions de CO2 (tonnes métriques par habitant) | Data ». [En ligne]. Disponible sur: <http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EN.ATM.CO2E.PC?view=map>. [Consulté le: 30-juin-2017].
- [20] J.C Keller, P.A Haldi, « Les conséquences de l'augmentation du taux de CO2 atmosphérique, état de la connaissance scientifique à fin 2010.pdf », présenté à World Engineers' Convention, Genève, Suisse, 2011.

- [21] « CO2 Emissions | Global Carbon Atlas ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.globalcarbonatlas.org/fr/CO2-emissions>. [Consulté le: 22-juin-2018].
- [22] Service de l'Observatoire et des Statistiques, « Bilan énergétique de la France pour 2015 ». nov-2016.
- [23] « Carte de France de l'ensoleillement ou gisement - Les énergies renouvelables ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.econologie.com/carte-france-ensoleillement-ou-gisement/>. [Consulté le: 24-mai-2018].
- [24] « Bilan électrique de la France : que retenir de 2015 ? », *Connaissance des Énergies*, févr-2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.connaissancedesenergies.org/bilan-electrique-de-la-france-que-retenir-de-2015-170510>. [Consulté le: 26-mai-2018].
- [25] S. Caballero, « Quelle est la part des énergies renouvelables en France ? », *Achats groupés d'énergie et énergie renouvelable*, 06-oct-2017. .
- [26] OER, « BER-2015.pdf ». 2016.
- [27] OME, « BEM 2011 édition 2012.pdf ». 2012.
- [28] M. Winskel, « The pursuit of interdisciplinary whole systems energy research: Insights from the UK Energy Research Centre », *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 37, p. 74-84, mars 2018.
- [29] A. Bosner, T. Porinsky, et I. Stanki, « Forestry and Life Cycle Assessment », in *Global Perspectives on Sustainable Forest Management*, D. C. A. Okia, Éd. InTech, 2012.
- [30] J. C. Gatina, N. I. Rakotonarivo, et D. Morau, « Systemic Approach of Functioning Of the Built Areas and Waste Management ».
- [31] J. Freis, P. Vohlidka, et W. Günthner, « Low-Carbon Warehousing: Examining Impacts of Building and Intra-Logistics Design Options on Energy Demand and the CO2 Emissions of Logistics Centers », *Sustainability*, vol. 8, n° 5, p. 448, mai 2016.
- [32] F. McLoughlin, A. Duffy, et M. Conlon, « Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study », *Energy Build.*, vol. 48, p. 240-248, mai 2012.
- [33] A. Moine, « Le territoire comme un système complexe. Des outils pour l'aménagement et la géographie », in *Septième Rencontres de Théo Quant*, Besançon, France, 2005.
- [34] Dujardin S., Labeeuw F.-L., Melin E., Pirart F., Teller J., « structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des GES », in *Actes colloque 2010*, 2011.
- [35] A. Moine, « Le territoire comme un outil de transdisciplinarité vers des diagnostics partagés », in *Fronts et frontières des sciences du territoires*, 2014.
- [36] D. Bigot, F. Miranville, A. H. Fakra, et H. Boyer, « A nodal thermal model for photovoltaic systems: Impact on building temperature fields and elements of validation for tropical and humid climatic conditions », *Energy Build.*, vol. 41, n° 11, p. 1117-1126, nov. 2009.
- [37] D. Bigot, F. Miranville, et H. Boyer, « Comfort study of a building with photovoltaic panels for the solar protection », in *Proceedings of the Second IASTED Africa Conference*, 2008, vol. 603, p. 36.
- [38] H. Thieblemont, F. Haghghat, A. Moreau, et G. Lacroix, « Control of electrically heated floor for building load management: A simplified self-learning predictive control approach », *Energy Build.*, vol. 172, p. 442-458, août 2018.
- [39] D. Frame, M. Hannon, K. Bell, et S. McArthur, « Innovation in regulated electricity distribution networks: A review of the effectiveness of Great Britain's Low Carbon Networks Fund », *Energy Policy*, vol. 118, p. 121-132, juill. 2018.
- [40] R. V. Jones et K. J. Lomas, « Determinants of high electrical energy demand in UK homes: Socio-economic and dwelling characteristics », *Energy Build.*, vol. 101, p. 24-34, août 2015.
- [41] A. Kavousian, R. Rajagopal, et M. Fischer, « Determinants of residential electricity consumption: Using smart meter data to examine the effect of climate, building characteristics, appliance stock, and occupants' behavior », *Energy*, vol. 55, p. 184-194, juin 2013.
- [42] Associations des entreprises électriques suisses, « Facteurs d'influence sur la demande en électricité ». août-2015.
- [43] RTE, « Les facteurs météorologiques et la conduite du système électrique français ». .

- [44] J.-U. Sjögren, S. Andersson, et T. Olofsson, « An approach to evaluate the energy performance of buildings based on incomplete monthly data », *Energy Build.*, vol. 39, n° 8, p. 945-953, août 2007.
- [45] S. Chen, N. Li, J. Guan, Y. Xie, F. Sun, et J. Ni, « A statistical method to investigate national energy consumption in the residential building sector of China », *Energy Build.*, vol. 40, n° 4, p. 654-665, janv. 2008.
- [46] C. H. Philip et W. K. Chow, « Energy use in commercial buildings in Hong Kong », *Appl. Energy*, vol. 69, n° 4, p. 243-255, 2001.
- [47] C. P. Ang, B. Toper, et A. Gambhir, « Financial impacts of UK's energy and climate change policies on commercial and industrial businesses », *Energy Policy*, vol. 91, p. 273-286, avr. 2016.
- [48] G. K. F. Tso et K. K. W. Yau, « Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks », *Energy*, vol. 32, n° 9, p. 1761-1768, sept. 2007.
- [49] L. G. Swan et V. I. Ugursal, « Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n° 8, p. 1819-1835, oct. 2009.
- [50] A. Fouquier, S. Robert, F. Suard, L. Stéphan, et A. Jay, « State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, p. 272-288, juill. 2013.
- [51] « Les zones insulaires / Introduction ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=zonesinsulaires>. [Consulté le: 19-juin-2018].
- [52] « Les zones insulaires / Introduction ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?rubrique=dossiers&srub=zonesinsulaires&action=imprimer>. [Consulté le: 25-sept-2018].
- [53] « Microgrids urbains : overview, enjeux et opportunités », *ENEA Consulting*, 02-févr-2017. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.enea-consulting.com/microgrids-urbains-opportunités/>. [Consulté le: 19-juin-2018].
- [54] P. Vergragt, L. Akenji, et P. Dewick, « Sustainable production, consumption, and livelihoods: global and regional research perspectives », *J. Clean. Prod.*, vol. 63, p. 1-12, janv. 2014.
- [55] G. Huebner, D. Shipworth, I. Hamilton, Z. Chalabi, et T. Oreszczyn, « Understanding electricity consumption: A comparative contribution of building factors, socio-demographics, appliances, behaviours and attitudes », *Appl. Energy*, vol. 177, p. 692-702, sept. 2016.
- [56] R. V. Jones, A. Fuertes, et K. J. Lomas, « The socio-economic, dwelling and appliance related factors affecting electricity consumption in domestic buildings », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, p. 901-917, mars 2015.
- [57] S. Finnegan, S. Sharples, T. Johnston, et M. Fulton, « The carbon impact of a UK safari park – Application of the GHG protocol using measured energy data », *Energy*, vol. 153, p. 256-264, juin 2018.
- [58] Y. G. Yohanis, J. D. Mondol, A. Wright, et B. Norton, « Real-life energy use in the UK: How occupancy and dwelling characteristics affect domestic electricity use », *Energy Build.*, vol. 40, n° 6, p. 1053-1059, janv. 2008.
- [59] J. Wang, C. Yu, et W. Pan, « Life cycle energy of high-rise office buildings in Hong Kong », *Energy Build.*, vol. 167, p. 152-164, mai 2018.
- [60] « Les différents types de cellules photovoltaïques - Ecosources ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaïques. [Consulté le: 22-juin-2018].
- [61] Commission électronique internationale, « Fiche technique PV polycristallin ». solar-kit, 2010.
- [62] H. N. Rafsanjani, C. R. Ahn, et J. Chen, « Linking building energy consumption with occupants' energy-consuming behaviors in commercial buildings: Non-intrusive occupant load monitoring (NIOLM) », *Energy Build.*, vol. 172, p. 317-327, août 2018.
- [63] F. W. Geels, A. McMeekin, J. Mylan, et D. Southerton, « A critical appraisal of Sustainable Consumption and Production research: The reformist, revolutionary and reconfiguration positions », *Glob. Environ. Change*, vol. 34, p. 1-12, sept. 2015.

- [64] H. Viot, A. Sempsey, L. Mora, J. C. Batsale, et J. Malvestio, « Model predictive control of a thermally activated building system to improve energy management of an experimental building: Part II - Potential of predictive strategy », *Energy Build.*, vol. 172, p. 385-396, août 2018.
- [65] « eco ferme de vincendo : un espace durable », *Site de ecoferme-vincendo !* [En ligne]. Disponible sur: <http://ecoferme-vincendo.jimdo.com/>. [Consulté le: 22-juin-2018].
- [66] OER, « BER-2016.pdf ». 2017.
- [67] G. AU, « Bilan énergétique de la France pour 2010 ».
- [68] Hoarau Christelle, « Projet de conception et d'aménagement de l'Eco Ferme de Vincendo », Université de La Réunion, Mémoire de fin d'étude Master2, 2013.
- [69] Adrien CHAUSSINAND, « Diagnostic et expertise énergétique d'un bâtiment administratif "Minergie-ECO" construit en paille à Lausanne », sept-2014.
- [70] Mathieu M., Rüdinger A., Pescia D., « L'intégration des énergies renouvelables dans le système électrique français : quels enjeux d'optimisation? », *Iddri Paris Fr.*, vol. Working Papers, n° N°01/16, p. 16 P, 2016.
- [71] P. Menanteau et C. Clastres, « L'intégration des énergies renouvelables: le débat est aussi économique », *Tech. Ing. Environ.-Sécurité-Energ.*, n° 2, p. 1-3, 2009.
- [72] F. Diop, M. Hennebel, et M. Petit, « Gestion autonome de la consommation électrique d'une maison en présence d'une production photovoltaïque.pdf », présenté à Symposium de Génie Electrique, Grenoble, 2016.
- [73] « CLIMAT LA REUNION - Descriptions, records de pluie, record de vent, ... » [En ligne]. Disponible sur: <http://www.meteofrance.re/climat/description-du-climat>. [Consulté le: 22-oct-2017].
- [74] « PLAN SAINT-JOSEPH - Plan, carte et relief de Saint-Joseph 97480 ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.cartesfrance.fr/carte-france-ville/plan_97412_Saint-Joseph.html. [Consulté le: 19-juin-2018].
- [75] Nuclear Energy Agency, Éd., *Nuclear energy and renewables: system effects in low-carbon electricity systems*. Paris: OECD, 2012.
- [76] N. Boogen, S. Datta, et M. Filippini, « Demand-side management by electric utilities in Switzerland: Analyzing its impact on residential electricity demand », *Energy Econ.*, vol. 64, p. 402-414, mai 2017.
- [77] B. Celik, R. Roche, S. Suryanarayanan, D. Bouquain, et A. Miraoui, « Electric energy management in residential areas through coordination of multiple smart homes », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, p. 260-275, déc. 2017.
- [78] « Foire aux Questions - Autoconsommation photovoltaïque », *SB ENERGY - Solaire photovoltaïque*. .
- [79] Météo France, « Données météorologique Saint-Joseph.pdf ». .
- [80] SEPEN, « Eolienne Eolys - metronome - 12 kw - Petit éolien », Rapport Test n°30.5, 2013.
- [81] « Info Eolien : le prix d'une éolienne ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.info-eolien.com/eolienne-cout.html>. [Consulté le: 07-juin-2018].
- [82] ARER, « BER_Technique_2011.pdf ». 2011.
- [83] Service de l'Observatoire et des Statistiques, « BEF 2011.pdf ». 2012.
- [84] B. Mahalingam et W. H. Orman, « GDP and energy consumption: A panel analysis of the US », *Appl. Energy*, vol. 213, p. 208-218, mars 2018.
- [85] D.A Charif, S. Attali, B. Daubin, Y. Mayet, A. Mkadara, W. Tavanday, « Rapport annuel 2015 », IEDOM, Mayotte, Rapport annuel, 2016.
- [86] S. Scarpetta et G. Pierre, « Development and Employment : A Mutual Relationship.pdf », in *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, Second Edition., James D. Wright, 2015, p. 269-275.
- [87] Préfecture de Mayotte, Département de Mayotte, « PPE de Mayotte - Rapport énergétique 2016-2018/2019-2023.pdf », Journal officiel de la République française, N°268, nov. 2015.
- [88] « Comparatif autonomie des voitures électriques », *Les voitures électriques*. .
- [89] « Electricite de Mayotte | EDM | Production, Distribution et commercialisation de l'électricité à Mayotte ». .

- [90] « Publications - Mayotte - IEDOM ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.iedom.fr/mayotte/publications/>. [Consulté le: 22-juin-2018].
- [91] INSEE, « Taux d'équipement des ménages d'outre-mer selon le département d'outre-mer ». 2011.
- [92] Conseil départemental de Mayotte, Préfecture de Mayotte, et Antenne de l'Ademe Mayotte, « EBAUCHE D'UNE STRATEGIE LOCALE POUR LA TRANSITION ENERGETIQUE A MAYOTTE ». 2013.
- [93] « Open Data EDF Corse & Outre-mer — Explore ». [En ligne]. Disponible sur: <https://opendata-corse-outremer.edf.fr/explore/?sort=modified>. [Consulté le: 25-janv-2018].
- [94] Département de Mayotte et Préfecture de Mayotte, Département de Mayotte, « Puissance maximum appelée du réseau sur un jour de 2006 à 2014 (MW).pdf ». 2015.
- [95] « PVGIS : logiciel en ligne de simulation ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.photovoltaique-energie.fr/pvgis-logiciel-en-ligne-de-simulation.html>. [Consulté le: 29-août-2017].
- [96] « Climatologie de l'année 2014 à Dzaoudzi / Pamanzi Mayotte - Infoclimat ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2014/dzaoudzi-pamanzi-mayotte/valeurs/67005.html>. [Consulté le: 01-sept-2017].
- [97] G. Martín-Rodríguez et J. J. Cáceres-Hernández, « Modelling the hourly Spanish electricity demand », *Econ. Model.*, vol. 22, n° 3, p. 551-569, mai 2005.
- [98] T. Sylvestre, « Modélisation et prévision de la consommation horaire d'électricité au Québec. Comparaison de méthodes de séries temporelles.pdf », Québec, Canada, Rapport de stage de fin d'étude Master 2, 2013.
- [99] « Open Data EDF Corse & Outre-mer — Courbe de charge de la production d'électricité par filière ». [En ligne]. Disponible sur: https://opendata-corse-outremer.edf.fr/explore/dataset/courbe-de-charge-de-la-production-deelectricite-par-filiere/table/?disjunctive.territoire&sort=-date_heure&refine.territoire=R%C3%A9union. [Consulté le: 07-sept-2017].
- [100] Région Réunion et Préfecture de La Réunion, « PPE de La Réunion 2016-2018/2019-2023 ». Décembre-2016.
- [101] Département de Mayotte et Préfecture de Mayotte, Département de Mayotte, « PPE Mayotte - Rapport énergétique 2016-2018/2019-2023 ». 19-nov-2015.
- [102] J. T. Mensah, G. Marbuah, et A. Amoah, « Energy demand in Ghana: A disaggregated analysis », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, p. 924-935, janv. 2016.
- [103] « Séries | Insee ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.insee.fr/fr/statistiques/series/102774338?ZONE_GEO=2322816. [Consulté le: 26-janv-2018].
- [104] « 256 500 habitants à Mayotte en 2017 - Insee Focus - 105 ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3286558>. [Consulté le: 26-janv-2018].
- [105] « 256 500 habitants à Mayotte en 2017 - Insee Focus - 105 ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3286558>. [Consulté le: 22-juin-2018].
- [106] « Séries | Insee ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.insee.fr/fr/statistiques/series/102774338?ZONE_GEO=2322816. [Consulté le: 22-juin-2018].
- [107] F. Husson, L. Sébastien, et J. Pagès, *Analyse de données avec R*, Presses Universitaires de Rennes. 2009.
- [108] F. Bénard-Sora et J. P. Praene, « Territorial analysis of energy consumption of a small remote island: Proposal for classification and highlighting consumption profiles », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, p. 636-648, juin 2016.
- [109] « Courbe de charge de la production d'électricité par filière ». [En ligne]. Disponible sur: https://opendata-corse-outremer.edf.fr/explore/dataset/courbe-de-charge-de-la-production-deelectricite-par-filiere/table/?disjunctive.territoire&sort=-date_heure&refine.territoire=R%C3%A9union. [Consulté le: 22-juin-2018].
- [110] ADEME, « Strategie Transition Energétique ». 2013.
- [111] CRE, « Rapport sur la mission de la CRE à Mayotte et à la Réunion », Juillet 2015.

- [112]« Bilan énergétique de la France en 2016 - Données définitives [Publications, Datalab essentiel, 2017] : Observation et statistiques ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2668/969/bilan-energetique-france-2016-donnees-definitives.html>. [Consulté le: 18-juin-2018].
- [113]« CLIMAT MAYOTTE - Description du climat de Mayotte par Météo-France ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.meteofrance.yt/climat/description-du-climat>. [Consulté le: 16-juin-2018].
- [114]Y. M. Irwan *et al.*, « Stand-Alone Photovoltaic (SAPV) System Assessment using PVSYST Software », *Energy Procedia*, vol. 79, p. 596-603, nov. 2015.
- [115]T. Huld, R. Müller, et A. Gambardella, « A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa », *Sol. Energy*, vol. 86, n° 6, p. 1803-1815, juin 2012.
- [116]« JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission ». [En ligne]. Disponible sur: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html. [Consulté le: 22-juin-2018].

LETTRÉ D'ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT

Je, soussigné(e) **NIDHOIMI EL ASSAD** en ma qualité de doctorant(e) de l'Université de La Réunion, déclare être conscient(e) que le plagiat est un acte délictueux passible de sanctions disciplinaires. Aussi, dans le respect de la propriété intellectuelle et du droit d'auteur, je m'engage à systématiquement citer mes sources, quelle qu'en soit la forme (textes, images, audiovisuel, internet), dans le cadre de la rédaction de ma thèse et de toute autre production scientifique, sachant que l'établissement est susceptible de soumettre le texte de ma thèse à un logiciel anti-plagiat.

Fait à Saint-Denis le : 02/07/2018

Signature :



Extrait du Règlement intérieur de l'Université de La Réunion
(validé par le Conseil d'Administration en date du 11 décembre 2014)

Article 9. Protection de la propriété intellectuelle – Faux et usage de faux, contrefaçon, plagiat

L'utilisation des ressources informatiques de l'Université implique le respect de ses droits de propriété intellectuelle ainsi que ceux de ses partenaires et plus généralement, de tous tiers titulaires de ces droits.

En conséquence, chaque utilisateur doit :

- utiliser les logiciels dans les conditions de licences souscrites ;
- ne pas reproduire, copier, diffuser, modifier ou utiliser des logiciels, bases de données, pages Web, textes, images, photographies ou autres créations protégées par le droit d'auteur ou un droit privatif, sans avoir obtenu préalablement l'autorisation des titulaires de ces droits.

La contrefaçon et le faux

Conformément aux dispositions du code de la propriété intellectuelle, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle d'une œuvre de l'esprit faite sans le consentement de son auteur est illicite et constitue un délit pénal.

L'article 444-1 du code pénal dispose : « Constitue un faux toute altération frauduleuse de la vérité, de nature à causer un préjudice et accomplie par quelque moyen que ce soit, dans un écrit ou tout autre support d'expression de la pensée qui a pour objet ou qui peut avoir pour effet d'établir la preuve d'un droit ou d'un fait ayant des conséquences juridiques ».

L'article L335_3 du code de la propriété intellectuelle précise que : « Est également un délit de contrefaçon toute reproduction, représentation ou diffusion, par quelque moyen que ce soit, d'une œuvre de l'esprit en violation des droits de l'auteur, tels qu'ils sont définis et réglementés par la loi. Est également un délit de contrefaçon la violation de l'un des droits de l'auteur d'un logiciel (...) ».

Le plagiat est constitué par la copie, totale ou partielle d'un travail réalisé par autrui, lorsque la source empruntée n'est pas citée, quel que soit le moyen utilisé. Le plagiat constitue une violation du droit d'auteur (au sens des articles L 335-2 et L 335-3 du code de la propriété intellectuelle). Il peut être assimilé à un délit de contrefaçon. C'est aussi une faute disciplinaire, susceptible d'entraîner une sanction.

Les sources et les références utilisées dans le cadre des travaux (préparations, devoirs, mémoires, thèses, rapports de stage...) doivent être clairement citées. Des citations intégrales peuvent figurer dans les documents rendus, si elles sont assorties de leur référence (nom d'auteur, publication, date, éditeur...) et identifiées comme telles par des guillemets ou des italiques.

Les délits de contrefaçon, de plagiat et d'usage de faux peuvent donner lieu à une sanction disciplinaire indépendante de la mise en œuvre de poursuites pénales.