

# UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



**UFR: SCIENCES ET TECHNOLOGIES**

**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

**Mémoire de master 2 physique et Applications**

**Spécialité: Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan**

## **Analyse technico-économique et de l'impact environnemental de solutions d'énergies renouvelables pour la mairie de Ziguinchor**

**Présenté par:**

**DIOP Sambalaye**

**Sous la direction de :**

**Dr NDIAYE Ababacar**

**Soutenu publiquement le 21 mars 2019 devant le jury composé de :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>	<b>Etablissement</b>
KOBOR Diouma	Professeur	Président	(UASZ)
DIATTA Samo	Maître-Assistant	Rapporteur	(UASZ)
NDIAYE Lat Grand	Maître-Conférences	Examineur	(UASZ)
MBAYE Mamadou Lamine	Assistant	Examineur	(UASZ)
NDIAYE Ababacar	Maître-Assistant	Encadrant	(UASZ)

Année Académique 2017-2018

## DEDICACES

Je dédie ce travail à

Ma mère yaya Fatou Diouf décédée quand j'étais en première année à l'Université Cheikh Anta DIOP. Que la terre de mon village natal, Latmingué soit légère pour ma Maman.

Ainsi, à mon père EL Boubacar DIOP et mes frères qui m'ont toujours soutenu et se sont investis pour la réussite de mes études.

Mes sœurs Marie DIOP, Ndeye Kamboul DIOP, Coumba Sarr DIOP, Maty DIOP, Awa DIOP, Thioro DIOP, Sophie DIOP en fin ma femme Mariama SANE ainsi qu'à toute sa famille.

Tout le personnel de la Mairie de Ziguinchor.

Tous mes ami(e)s et mes camarades de promotion.

## REMERCIEMENTS

Au nom d'ALLAH le tout miséricordieux, le très miséricordieux, prière au prophète Mohamed (PSL) et sa famille. Louage à ALLAH qui nous a donné la santé pour achever ce travail.

Par cette occasion, je tiens à remercier tout d'abord la Directrice des ressources humaines de la Mairie de Ziguinchor Mme Mariama Monsane Diouf de m'avoir facilitée l'obtention de la convention de stage. Je remercie M. Alioune Dième mon maître de stage, Agent voyer de la VOIRIE pour sa disponibilité à coordonner tous mes déplacements au sein des structures. Je profite pour remercier tous le personnel ainsi que le Maire Mr Abdoulaye Baldé.

Je remercie Dr Ababacar Ndiaye, mon professeur encadreur, pour sa disponibilité et ces pertinentes remarques. Je tiens à remercier au nom de mon encadrant le Directeur de l'ESP, responsable du laboratoire de CIFRES M. Pape Alioune Sarr Ndiaye et le personnel du Labo pour m'avoir accueilli et intégrer lors de la rédaction du mémoire. Je remercie aussi M. Sall ingénieur des énergies renouvelables à la Senelec de Ziguinchor pour ces contributions au rapport.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, sans oublier mes camarades de promos ainsi que le corps professoral de l'Université de Ziguinchor, en particulier les membres du jury qui ont présidé ce travail et l'ensemble des professeurs du département de physique.

Je remercie toute ma famille qui m'a épaulé durant toutes ces années. Sans eux ce mémoire n'aurait pas lieu. Ainsi je remercie aussi toute la famille Sané.

Enfin, je tiens à remercier l'ensemble des chercheurs du Laboratoire de LOSEC et le centre de l'insertion professionnel des étudiants de leurs colobarations.

## Table des matieres

DEDICACES .....	I
REMERCIEMENTS.....	II
TABLE DES MATIERES .....	III
LISTE DES FIGURES .....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS .....	IX
RESUME .....	X
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> :.....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES DANS LE CONTEXTE SENEGALAIS.....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>3</b>
<b>I.1. GENERALITE SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE</b> .....	<b>3</b>
<i>I.1.1. Historique du changement climatique</i> .....	<i>3</i>
<i>I.1.2. Les Gaz à effets de serre</i> .....	<i>4</i>
<i>I.1.3. Effets du changement climatique</i> .....	<i>5</i>
<i>I.1.4. Mécanisme de flexibilité du changement climatique</i> .....	<i>6</i>
<b>I.2. GENERALITE SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES</b> .....	<b>7</b>
<i>I.2.1. Les différentes sources d'énergies renouvelables</i> .....	<i>7</i>
<i>I.2.1.1. Energie solaire</i> .....	<i>7</i>
<i>I.2.1.2. Energie éolienne</i> .....	<i>8</i>
<i>I.2.1.3. Bioénergie</i> .....	<i>9</i>
<i>I.2.1.4. Energie hydroélectrique</i> .....	<i>9</i>
<i>I.2.1.5. Energie géothermique</i> .....	<i>10</i>
<i>I.2.1.6. Energie marine</i> .....	<i>10</i>
<b>I.3. ENERGIES RENOUVELABLES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE</b> .....	<b>10</b>
<i>I.3.1. Potentiel d'atténuation du changement climatique par les énergies renouvelable</i> .....	<i>10</i>
<i>I.3.2. Intégration des énergies renouvelable dans les Bâties</i> .....	<i>10</i>
<i>I.3.3. Energies renouvelables dans le contexte du développement durable</i> .....	<i>10</i>
<b>I.4. POLITIQUE ET POTENTIEL DES ENERGIES RENOUVELABLES AU SENEGAL</b> .....	<b>11</b>
<i>I.4.1. Aspect politiques et institutionnels</i> .....	<i>11</i>
<i>I.4.2. Potentiel et puissance installée</i> .....	<i>11</i>
<i>I.4.2.1. Potentiel Solaires et puissance installée</i> .....	<i>12</i>
<i>I.4.2.2. Potentiel Eoliens et puissance installée</i> .....	<i>14</i>
<i>Conclusion</i> .....	<i>15</i>
<b>CHAPITRE II : BILAN CARBONE DE LA MAIRIE DE ZIGUINCHOR</b> .....	<b>16</b>

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>16</b>
<b>II.1. PRESENTATION DE LA REGION DE ZIGUINCHOR.....</b>	<b>16</b>
<b>II.2. MAIRIE DE ZIGUINCHOR .....</b>	<b>16</b>
<b>II.3. VARIABILITES CLIMATIQUES DE LA REGION.....</b>	<b>18</b>
<i>II.3.1. Humidités et Pluviométries .....</i>	<i>18</i>
<i>II.3.2. Vitesse du vent et rayonnement solaire.....</i>	<i>19</i>
<b>II.4. BILAN DE PUISSANCE ELECTRIQUE .....</b>	<b>19</b>
<i>II.4.1. Collecte des données.....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<i>II.4.2. Relevé de la caractéristique des charges.....</i>	<i>20</i>
<i>II.4.3.1. Consommation VOIRIE.....</i>	<i>20</i>
<i>II.4.3.2. Consommation Ancienne Mairie .....</i>	<i>21</i>
<i>II.4.3.3. Consommation de la Recette et Perception Municipale (RPM) .....</i>	<i>23</i>
<i>II.4.3.4. Consommation Nouvelle Mairie .....</i>	<i>25</i>
<i>II.4.3.5. Synthèse et bilan global de la consommation électrique.....</i>	<i>28</i>
<b>II.5. EVALUATION DU BILAN CARBONE.....</b>	<b>28</b>
<i>II.5.1. Définition du Bilan Carbone.....</i>	<i>28</i>
<i>II.5.2. Bilan Carbone des différentes structures .....</i>	<i>28</i>
<i>II.5.6. Synthèse et Bilan Carbone globale .....</i>	<i>29</i>
<i>Conclusion .....</i>	<i>30</i>
<b>CHAPITRE III : METHODOLOGIE ET DIMENSIONNEMENT DES SOLUTIONS PROPOSEES .....</b>	<b>31</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>31</b>
<b>III.1. PRESENTATION DES OUTILS DE TRAVAIL.....</b>	<b>31</b>
<i>III.1.1. HOMER .....</i>	<i>31</i>
<i>III.1.1.1. Caractéristiques de l'outil.....</i>	<i>32</i>
<i>III.1.1.2. Interface .....</i>	<i>32</i>
<i>III.1.2. RETScreen .....</i>	<i>33</i>
<i>III.1.2.1. Caractéristiques de l'outil.....</i>	<i>33</i>
<i>III.1.2.2. Interface .....</i>	<i>34</i>
<b>III.2. DONNEES METROLOGIQUES UTILISEES POUR LES OUTILS .....</b>	<b>34</b>
<b>III.3. METHODES DE DIMENSIONNEMENTS DES ELEMENTS .....</b>	<b>35</b>
<i>III.3.1. Dimensionnement avec HOMER.....</i>	<i>36</i>
<i>III.3.1.1. Dimensionnement du champ PV.....</i>	<i>36</i>
<i>III.3.1.2. Dimensionnement du réseau .....</i>	<i>37</i>
<i>III.3.1.3. Dimensionnement convertisseur .....</i>	<i>38</i>
<i>III.3.1.4. Dimensionnement des éoliennes .....</i>	<i>39</i>

<i>III.3.1.5. Dimensionnement de la génératrice</i> .....	40
<i>III.3.1.6. Dimensionnement des batteries</i> .....	40
<i>III.3.2. Dimensionnement avec RETScreen</i> .....	41
<i>III.3.2.2. Dimensionnement du champ PV</i> .....	43
<i>III.3.2.3. Dimensionnement de la génératrice</i> .....	43
<i>III.3.2.4. Dimensionnement du réseau</i> .....	44
<i>III.3.2.5. Coûts des éléments pour le dimensionnement</i> .....	44
<b>CHAPITRE IV : ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL DES SOLUTIONS PROPOSEES</b> .....	<b>46</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>46</b>
<b>IV.1. PRESENTATIONS DES SOLUTIONS</b> .....	<b>46</b>
<i>IV.1.1. Solutions Obtenues par HOMER</i> .....	46
<i>IV.1.1.1. Solutions Globales</i> .....	46
<i>IV.1.1.2. Solutions optimales</i> .....	48
<i>IV.1.2. Solutions obtenues par RETScreen</i> .....	50
<i>IV.1.2.1. Solutions selon l'espace disponible pour les Structures</i> .....	50
<b>IV.2. ANALYSE COMPARATIVE DES COUTS INVESTISSEMENTS DE DEUX SOLUTIONS PROPOSEES</b> .....	<b>52</b>
<b>IV.3. ANALYSE DE L'IMPACT DES EMISSIONS EVITEES SUR LE BILAN CARBONE</b> .....	<b>53</b>
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>55</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>56</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>57</b>
<b>ANNEXE</b> .....	<b>II</b>
<i>Annexe 1: Graphe du flux monétaire pour la solution PV/intègre au réseau Voirie</i> .....	<i>II</i>
<i>Annexe 3: Graphe du flux monétaire pour la solution PV/intégré au réseau électrique Ancienne Mairie</i> .....	<i>iIII</i>
<i>Annexe 6: Graphe du flux monétaire pour la solution PV/batteries et PV/batteries/groupe pour la RPM</i> .....	<i>IV</i>
<i>Annexe 7: Graphe du flux monétaire pour la solution PV/intégré au réseau électrique Nouvelle Mairie</i> .....	<i>iV</i>
<i>Annexe 8: Graphe du flux monétaire pour la solution PV/batteries et PV/batteries/groupe pour la Nouvelle Mairie</i> .....	<i>Vi</i>

## Liste des figures

Figure 1 : Part des différents gaz à effet de serre .....	4
Figure 2: images des impacts du changement climatique .....	5
Figure 3: Dakar et Saloum zones vulnérable à l'inondation en 2100 . .....	5
Figure 4: évolution des émissions de CO <sub>2</sub> au Sénégal de 1960 à 2015 .....	7
Figure 5: illustration des sources d'énergies renouvelable .....	7
Figure 6: Augmentation de la taille moyenne des éoliennes commercialisées .....	8
Figure 7: illustration du développement durable.....	11
Figure 8: répartition globale de l'irradiation spatiale du Sénégal .....	12
Figure 9: Carte préliminaire de vitesses moyennes du vent à 10m .....	14
Figure 10 : Localisation physique de la région de Ziguinchor.....	16
Figure 11: Organigramme des compétences de la Mairie.....	17
Figure 12: Carte de localisation des structures de la zone d'études.....	18
Figure 13: Variation moyenne de la pluviométrie et l'humidité de la région de Ziguinchor... ..	19
Figure 14: Variation moyenne mensuelle de l'ensoleillement et de la vitesse du vent.....	19
Figure 15: Profil de charge journalier de la VOIRIE .....	21
Figure 16: Profil de charge mensuel de la VOIRIE .....	21
Figure 17: Profil de charge journalier de l'ancienne Mairie .....	23
Figure 18: Profil de charge mensuel de l'ancienne Mairie .....	23
Figure 19: Profil de charge journalier de la Recette et Perception Municipale .....	25
Figure 20: Profil de charge mensuel Recette et Perception Municipale .....	25
Figure 21: Profil de charge journalière de la Structure de la Nouvelle Mairie .....	27
Figure 22: Profil de charge mensuel pour la Nouvelle Mairie .....	27
Figure 23: Synthèse du Bilan Carbone.....	29
Figure 24: Les différentes technologies proposées aux structures Mairie de Ziguinchor.....	31
Figure 25: Schéma de fonctionnement de HOMER.....	32
Figure 26: Interface de l'outil HOMER .....	33
Figure 27: Interface de l'outil RETScreen .....	34
Figure 28: Profils moyens mensuels de l'ensoleillement de la région de Ziguinchor sur l'horizontal .....	35
Figure 29: Profils moyennes mensuels de la vitesse du vent à 10m de la région de Ziguinchor .....	35
Figure 30: Architectures des solutions proposées par HOMER .....	36
Figure 31: Dimensionnement du panneau PV de 1 kWc par HOMER.....	37

Figure 32: Dimensionnement d'un réseau fournisseur .....	38
Figure 33: exemple de dimensionnement d'un convertisseur .....	39
Figure 34: Dimensionnement de l'EolSenegal 0,5 Kw .....	39
Figure 35 : Dimensionnement de la génératrice.....	40
Figure 36 : Dimensionnement de la batterie .....	41
Figure 37: résumées des étapes du dimensionnement des éléments dans RETScreen .....	42
Figure 38: Exemple de dimensionnement d'une batterie.....	43
Figure 39:Exemple de dimensionnement du champ PV .....	43
Figure 40 : Exemple de dimensionnement d'une génératrice .....	44
Figure 41: Exemple de dimensionnement du réseau.....	44
Figure 42: Coûts des éléments dimensionnés .....	45
Figure 43: Répartition de la production des quatre solutions proposées pour chaque structure .....	50
Figure 44: Cout investissement des solutions autonomes en fonction du taux de couverture .	53
Figure 45: émissions évitées par les solutions à taux de couverture 100% .....	54
Figure 46: Impacte des émissions évitées sur le bilan Carbone .....	55



## Liste des tableaux

Tableau 1: Pouvoir de réchauffement global des GES .....	4
Tableau 2: Classification des systèmes éoliens .....	8
Tableau 3: technologies et leurs gammes de puissances disponible .....	9
Tableau 4: Irradiance globale de certaines grandes villes du Sénégal .....	13
Tableau 5: Centrales promoteur .....	13
Tableau 6: Centrales promoteur en éoliennes .....	15
Tableau 7: Bilan de puissance et la consommation journalière de la VOIRIE .....	20
Tableau 8: Bilan de puissance et la consommation journalière de l'ancienne Mairie .....	22
Tableau 9: les facturations délivrées par la SENELEC.....	22
Tableau 10: Bilan de puissance et la consommation journalière Recette et Perception Municipal .....	24
Tableau 11: les facturations délivrées par la SENELEC pour la RPM.....	24
Tableau 12: Bilan de puissance et la consommation journalière de la Nouvelle Mairie .....	26
Tableau 13: la facturation délivrée par la SENELEC pour la Nouvelle Mairie.....	26
Tableau 14: Bilan Carbone des structures d'études .....	29
Tableau 15: Solutions globales proposées par HOMER.....	47
Tableau 16: Solutions optimales proposées par HOMER.....	49
Tableau 17: Solutions proposées par RETScreen en fonction de l'espace disponible .....	52

## Liste des acronymes et abréviations

**AEME: Agence pour l'Economie et la Maitrise de l'Energie**  
**ANEE: Agence Nationale de l'économie d'Energie**  
**ANER: Agence nationale des Energies Renouvelables**  
**ASER: Agence Sénégalaise de l'Electrification Rurale**  
**CCNUCC: Convention Cadre des Nations Unis sur les Changements Climatiques**  
**CIFRES: Centre International de Formation et de Recherche en Energies Solaire**  
**CERER: Centre d'Etude et de Recherche en Energies Renouvelables**  
**CIER: Comité Interministériel sur les Energies Renouvelables**  
**CNCC: Comité National sur le Changement Climatique**  
**COP: Conférence des Parties**  
**E: Energie consommé**  
**GES: Gaz à effet de serre**  
**GIEC: Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat**  
**Gg: Giga gramme**  
**Gt: Giga tonne**  
**GWh: Giga Watt heure**  
**kW: Kilo Watt**  
**kWh: kilo Watt heure**  
**LNER: Laboratoire National des Energies Renouvelables**  
**LRDEC: Laboratoire de Recherche en Diversification Energétique du Canada**  
**MDP: Mécanisme de Développement Propre**  
**MOC: Mise en œuvre Conjointe**  
**OMVG: Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie**  
**OMVS: Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal**  
**ONU: Organisation des Nations Unis**  
**PEEB: Programme mondial de l'Efficacités Energétique dans les Bâtiments**  
**PNUE: Programme des Nations unis pour l'Environnement**  
**PTFM: Plateforme Multifonctionnelle**  
**PRG: Pouvoir de Réchauffement Global**  
**P: Puissance**  
**PV: Photovoltaïque**  
**RPM: Recette Perception Municipale**  
**SENELEC: Société Nationale d'électricité**  
**SIE: Système d'information Energétique**

## Résumé

Cette étude, portant sur l'analyse technico-économique et de l'impact environnemental de solutions d'énergies renouvelables, s'inscrit d'une part dans le cadre de la lutte contre les émissions de GES et d'autre part dans la résolution des problèmes liés au système de compensation des paiements de factures d'électricité des structures de la Mairie de Ziguinchor. Le travail réalisé consiste à analyser et à comparer un ensemble de systèmes énergétiques pour répondre aux besoins de la consommation de manière totale ou partielle. Ainsi, la faisabilité des systèmes proposés est effectuée par les logiciels HOMER et RETScreen sur une période de 25 ans. D'abord, le logiciel HOMER est utilisé pour proposer des solutions autonomes telles que PV/réseau, PV/batteries, PV/batteries/éolienne et PV/batteries/groupe électrogène avec des charges variant de 64 à 320 KWh/j. Ces charges ont été établies à partir du bilan de puissance réalisé durant le séjour à la Mairie. Pour les simulations avec HOMER, des contraintes ont été appliquées pour optimiser les résultats dans le but d'obtenir des coûts d'investissements et des prix de revient de l'énergie beaucoup plus avantageux. Ensuite, pour ce qui est de RETScreen, il est utilisé pour exploiter l'espace disponible au niveau des structures et également déterminer certains paramètres tels que l'année de retour sur les capitaux investis, le taux de rendement interne (TRI) et la valeur actualisée nette (VAN). L'analyse des résultats obtenus a montré que les solutions selon l'espace disponible sont plus avantageuses sur le plan économique. Cependant, sur le plan environnemental les solutions autonomes purement renouvelables telles que le PV/Batteries/éoliennes et le PV/Batteries sont les meilleures car elles permettent de réduire respectivement 688 et 707 tonnes de CO<sub>2</sub> par an contre 507 tonnes émises par l'ensemble des structures pour une production énergétique d'origine fossile (SENELEC).

**Mots clés :** Photovoltaïque, éolien, Système hybride, impact environnemental

## ABSTRACT

This study, which deals with the techno-economic analysis and the environmental impact of renewable energy solutions, is part of the fight against GHG emissions and part of the resolution. problems related to the system of compensation of electricity bill payments of the structures of the Ziguinchor City Council. The work performed consists of analyzing and comparing a set of energy systems to meet the needs of consumption in whole or in part. Thus, the feasibility of the proposed systems is carried out by HOMER and RETScreen software over a period of 25 years. First, the HOMER software is used to offer standalone solutions such as PV / electrical network, PV / battery, PV / battery / wind and PV / battery/ Generator with loads ranging from 64 to 320 KWh / day. These expenses were established from the power budget realized during the stay at the Town Hall. For simulations with HOMER, constraints have been applied to optimize the results in order to obtain investment costs and much cheaper energy costs. Secondly, with respect to RETScreen, it is used to exploit the space available at the structural level and also to determine certain parameters such as return year on capital employed, internal rate of return (IRR) and value net discount (NPV). The analysis of the results obtained showed that the solutions according to the available space are more advantageous economically. However, in terms of the environment purely autonomous renewable solutions such as PV / Battery and PV / Battery / wind are the best because they can reduce respectively 707 and 688 tons of CO<sub>2</sub> per year against 507 tons issued by all structures for fossil energy production (SENELEC).

**Keywords:** Photovoltaic, wind, Hybrid system, environmental impact

## Introduction Générale :

Le développement rapide de l'économie africaine crée un défi énergétique très important à relever. Ce défi énergétique, dû à la hausse de la demande, constitue une menace lourde pour l'environnement. En effet, il repose en partie sur la consommation d'énergies fossiles [1] ; qui augmente les émissions de GES libérées. Cet effet additionnel des GES contribue aujourd'hui une part importante au changement climatique. Par ailleurs, ces ressources fossiles sont limitées dans le temps et coûtent excessivement chères.

C'est pour cette raison que des études ont été menées pour promouvoir l'exploitation du riche potentiel en énergies renouvelables dans un but de répondre aux besoins énergétiques. En effet, le faible accès à l'énergie est l'un des principaux facteurs qui bloque le développement du continent africain en général et du Sénégal en particulier. Le Sénégal est un pays à riche potentiel en énergies renouvelables dont l'accès au développement durable est freiné par la surconsommation énergétique des bâtiments publics qui consomment 49 % de l'énergie produite [2]. Ainsi, leurs parts en émissions annuelles représentent 40,6 % de tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'environnement [2]. L'accord historique signé à Paris en 2015 dont l'objectif majeur était orientée sur la transition énergétique des énergies renouvelables pour une réduction de 80 % des émissions de GES d'ici 2050, dans le but de maintenir la température au-dessous de 2°C [1]. Cet accord a montré que, si l'on veut parvenir aux objectifs mondiaux d'atténuation des effets du changement climatique, la transformation des énergies fossiles en énergie propre du secteur du bâtiment demeure nécessaire. Ainsi, dans les rapports du GIEC, il est affirmé clairement que pour atteindre les objectifs de réduction des GES il faut une alternative des énergies fossiles par les sources renouvelables [1].

Avec la mise en œuvre du partenariat de l'Association des Maires du Sénégal et celle de l'Association Internationale des Maires Francophones dans le cadre de l'adaptation au changement climatique et la réduction des émissions de GES ; les collectivités locales ont une mission fondamentale à jouer. Donc, il est de notre rôle en tant que chercheur d'y associer notre savoir-faire pour aider d'une part ces collectivités locales à atteindre leurs objectifs de réduction des émissions de GES ; et d'autre part à régler leur problème lié à leur système de compensation de paiement de leur facture d'électricité. C'est dans ce contexte qu'un sujet portant sur la proposition de solution d'énergies renouvelables aux structures de la Mairie de Ziguinchor fut

porté pour une étude. L'analyse technico-économique et environnementale est faite avec Homer et RETScreen pour aider les structures de la Mairie à utiliser, dans leurs consommations électriques, une part importante en énergies renouvelables pour faciliter l'accès du développement durable.

Plusieurs études ont été menées par l'ANER dans le cadre de l'autoconsommation et l'autonomisation des bâtiments publics afin de promouvoir les énergies renouvelables pour lutter contre les émissions des GES et faciliter l'accès énergétique [3].

Dans cette logique s'inscrit ce mémoire constitué de quatre (4) chapitres. Le premier chapitre traite le changement climatique et l'énergie renouvelable dans le contexte sénégalais. Le deuxième chapitre porte sur le Bilan carbone d'origine électrique des structures d'études. Il traite les données utilisées pour l'étude. Ensuite, le troisième chapitre porte sur la méthodologie et le dimensionnement des solutions proposées pour réduire la consommation et les émissions dans ces structures. Enfin le quatrième chapitre est réservé à l'analyse des résultats obtenus. La dernière partie de ce document est consacrée à la conclusion où un résumé succinct des résultats sera effectué, suivi de la présentation de quelques perspectives et recommandations.

# **Chapitre I : Changement climatique et énergies renouvelables dans le contexte Sénégalais**

## **Introduction**

Les effets dévastateurs du changement climatique ne cessent de frapper le monde dans tous les domaines. Ce dérèglement climatique est causé en partie par les émissions de gaz à effet de serre (GES). Ces derniers ont atteint un niveau alarmant de 53,5 gigatonnes équivalent CO<sub>2</sub> [1]. Or, pour limiter le réchauffement à 2 °C, il faudrait émettre au maximum 40 Gt en 2030 et 24 Gt pour 1,5°C [1]. Ainsi, pour lutter contre les effets causés principalement par les émissions de GES, dont les énergies fossiles représentant plus des trois quarts des émissions globales au niveau mondial, l'homme est appelé à développer d'autres sources énergétiques pour satisfaire sa consommation. Dans ce contexte, plusieurs technologies d'énergies renouvelables sont développées pour l'atténuation des émissions de GES d'origines anthropiques. Ainsi, le Sénégal s'est engagé dans cette dynamique comme d'autres pays pour exploiter son riche potentiel en énergies renouvelables. Les projets solaires et éoliens développés ont permis l'atténuation de 340000 tonnes de CO<sub>2</sub> par année au Sénégal [4]. Pour accentuer d'avantage cette lutte, le pays est appelé à développer les énergies renouvelables dans les bâtiments tertiaires et l'électrification des zones isolés.

## **I.1. Généralité sur le changement climatique**

### **I.1.1. Historique du changement climatique**

Avant l'ère de la civilisation industrielle, les scientifiques utilisaient la méthode de la paléoclimatologie pour étudier les variations climatiques de la planète Terre. Mais avec l'accélération des phénomènes climatiques, d'autres hypothèses ont été émises pour mesurer ces variations. L'effet de serre est utilisé pour décrire la rétention partielle des radiations solaires dans l'atmosphère [5]. Dans les années 1980, l'étude des émissions de gaz à effet de serre fit une apparition pour la première fois dans le journal New York Times précisément en 1981. En 1988, le GIEC est créé dans un but de faire comprendre aux gens les risques liés au changement climatique d'origines humaines [6]. La revue de la science sur le changement climatique a émis des incertitudes évidentes du réchauffement [7]. Plus tard, la confirmation de l'influence humaine est perçue sur le climat global avec des parts de 60 à 90 % [7]. Ces émissions de GES liées à l'activité anthropique sont causées en majorité par les combustibles fossiles pour satisfaire la demande énergétique de la population mondiale.

### I.1.2. Les Gaz à effets de serre

L'effet de serre est un phénomène physique naturel qui est important pour maintenir la température positive à la surface de la terre. Sans l'effet de serre, la température sur terre serait environ de moins 18 °C contre une moyenne de +15 °C aujourd'hui. Les principaux gaz à effet de serre (GES) et leur responsabilité sont présentés sur la figure 1 [8]. Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) contribue majoritairement aux effets des changements climatiques avec 55 %.

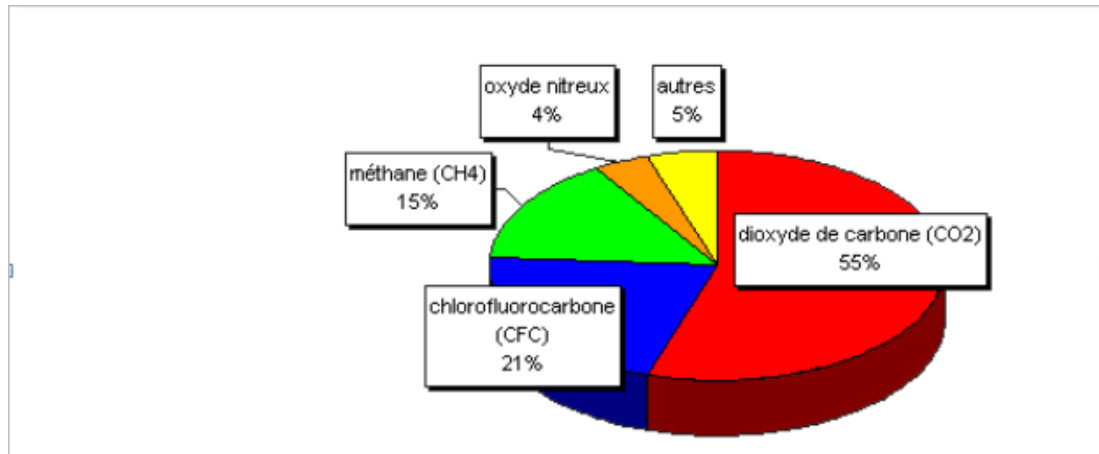


Figure 1 : Part des différents gaz à effet de serre [8]

Ainsi l'unité du pouvoir de réchauffement global (PRG) est créée à partir du pouvoir de captation du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> pour calculer l'équivalence carbone des autres gaz (voir tableau1)[8]. Il définit, la puissance radiative que le gaz à effet de serre renvoie vers le sol (forçage radiatif), la contribution de chaque GES sur le réchauffement. Par exemple, si on met 1 kg de méthane dans l'atmosphère, on produira le même effet sur un siècle que si on avait émis 21 kg de CO<sub>2</sub> (voir tableau1)[8].

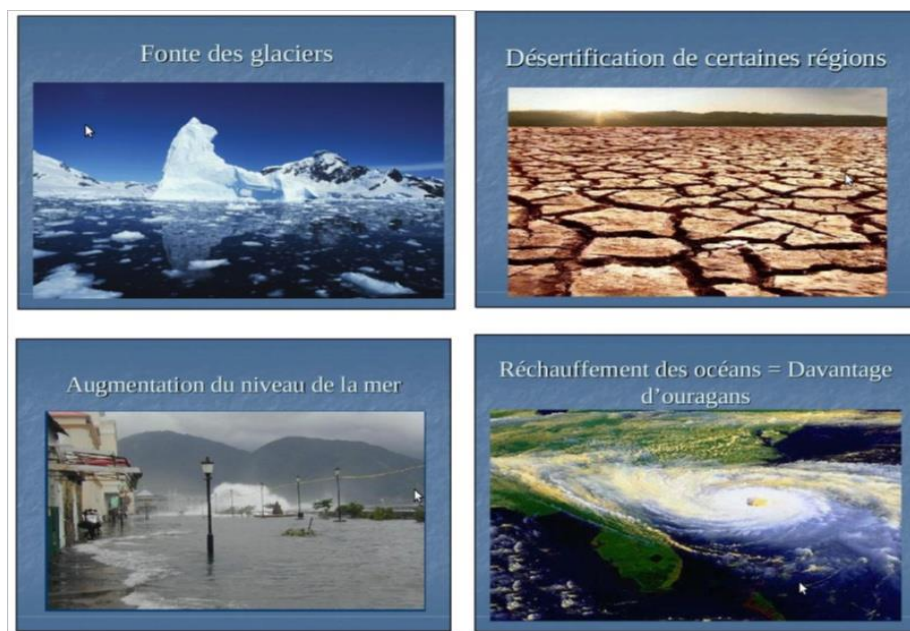
Tableau 1: Pouvoir de réchauffement global des GES [8]

<b>Pouvoir de réchauffement global</b>						
<b>Gaz</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>HFC</b>	<b>PFC</b>	<b>SF<sub>6</sub></b>
<b>Durée de vie</b>	50 à 200 ans	12 ans	114 ans	HFC23 : 257 ans	-	-
<b>PRG (à 20 ans)</b>	1	56	280	460 à 9 100	4 400 à 6 200	16 300
<b>PRG (à 100 ans)</b>	1	21	310	140 à 11 700	6 500 à 9 200	23 900

### I.1.3. Effets du changement climatique

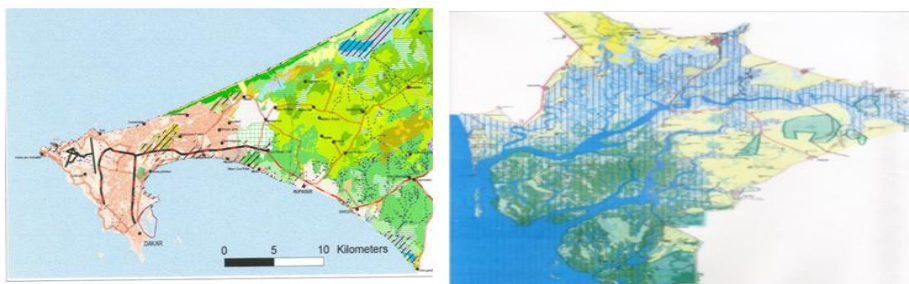
Aujourd'hui, on assiste à une augmentation des GES dû à l'activité anthropique car 90 % de l'énergie primaire fournie est d'origine fossile [1]. L'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère a plusieurs conséquences. Et ces dernières se manifestent sous différentes formes dont on peut citer quelques-unes :

- Fonte des glaciers due à l'augmentation de la température ;
- Augmentation du niveau de la mer ;
- Changement des régimes de pluies, inondation d'une part et d'autre part des sécheresses. Ainsi, ces phénomènes sont illustrés sur la figure 2 [8].



**Figure 2: images des impacts du changement climatique [8]**

Au niveau, régional particulièrement au Sénégal, des zones vulnérables avec un minimum d'inondation de 2 m en 2100 sont prévus par les scénarios [8]. Il s'agit de la région de Dakar et des Estuaires du Saloum figure 3 (image à gauche Dakar, image à droite Saloum) [8].



**Figure 3: Dakar et Saloum zones vulnérables à l'inondation en 2100 [8].**



Pour faire face à ces impacts négatifs du changement climatique, un traité international nommé Kyoto, ayant pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre globalement de 5,2 %, fut acté en 1997. Il est entré en vigueur en 2005 après l'adhésion de la Russie et prévoit des mécanismes pour réduire les GES.

#### **I.1.4. Mécanisme de flexibilité du changement climatique**

Le Protocole de Kyoto prévoit trois mécanismes de réduction des GES [8] :

- Permis d'émission qui permet de vendre ou d'acheter des droits à émettre des GES entre les pays industrialisés afin d'améliorer les systèmes de productions les plus polluants ;
- Mise en œuvre conjointe (MOC), mécanismes de financement de projets ayant pour objets principaux le stockage de carbone et la réduction de GES;
- Mécanisme de développement propre (MDP), fondé sur des projets de réduction d'émissions ou de séquestration de gaz à effet de serre (GES).

Pour renforcer ces mécanismes, des initiatives ont été prises lors de la conférence des parties tenues à Paris (COP21) qui consistent à exiger aux pays hors annexes de réaliser des bilans de leurs émissions annuelles. Ceci dans un contexte de développer des processus d'atténuation et d'adaptation aux effets du changement climatique. Le Sénégal a signé et ratifié en (juin 1992 et mai 1994) la CCNUCC et le Protocole de Kyoto (juillet 2001) et s'est engagé ainsi à réaliser des bilans annuels d'émission des GES. Quarante-neuf pourcent (49 %) des émissions de CO<sub>2</sub> sont dues au secteur de l'énergie [9]. Ces émissions annuelles augmentent chaque année selon la banque mondiale (voir figure 4). Des scénarios du troisième rapport de la SIE sur l'estimation des émissions de GES prouvent que d'ici 2030 le Sénégal émettra 30133 Gg de CO<sub>2</sub>, soit 2,4 fois supérieure à celle de 2005 [9]. Pour lutter contre ces émissions, il est primordial d'adopter le Programme des Nation Unies pour l'Environnement. Selon son programme, le développement à grande échelle des énergies renouvelables est la démarche clé pour verdir l'économie en se basant sur trois facteurs :

- Ses potentiels d'atténuations du changement climatique ;
- Ses potentiels d'économie d'énergie fossile ;
- Ses capacités à générer des « emplois verts ».

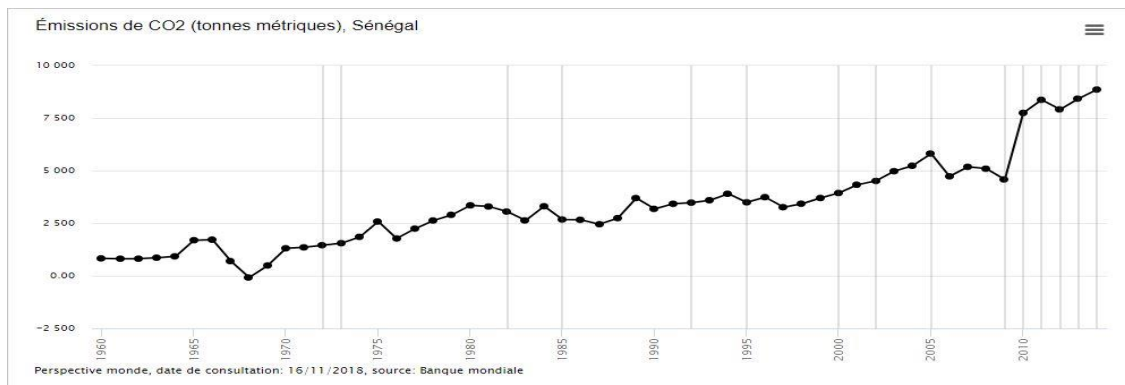


Figure 4: évolution des émissions de CO<sub>2</sub> au Sénégal de 1960 à 2015 [10]

## I.2. Généralité sur les énergies renouvelables

Les Energies renouvelables sont des énergies provenant de sources naturelles non épuisables (soleil, vent, marée...). Elles sont des sources d'atténuation très importantes des GES.

### I.2.1. Les différentes sources d'énergies renouvelables

Aujourd'hui, il y'a plusieurs sources d'énergies renouvelables développées dans le monde pour lutter contre les effets du changement climatique. Ainsi, ces sources peuvent être vues dans la figure 5 [11].

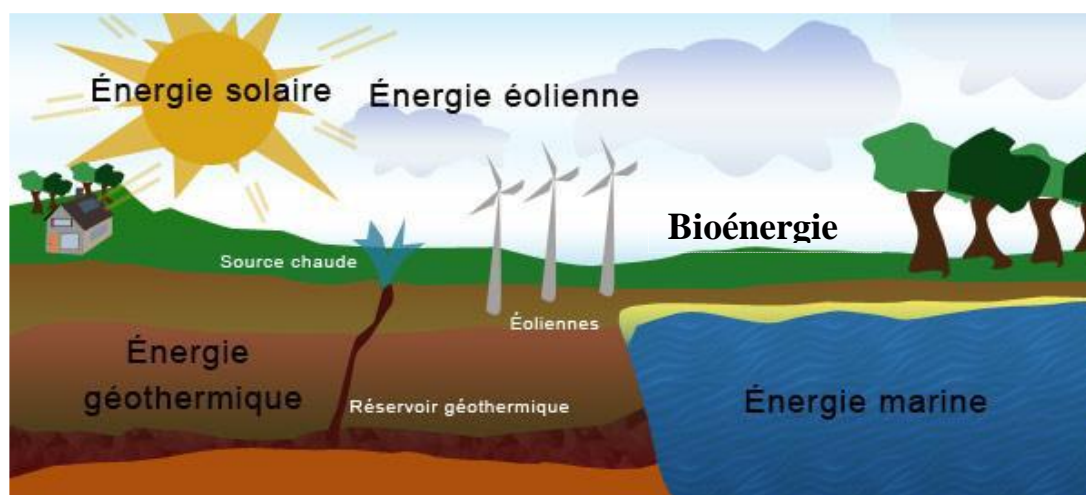


Figure 5: illustration des sources d'énergies renouvelable [11]

#### I.2.1.1. Énergie solaire

C'est l'énergie diffusée par le rayonnement du soleil transformée en électricité au moyen d'une cellule photovoltaïque. Cette dernière est fabriquée avec des matériaux semi-conducteurs produits le plus souvent à partir de silicium.

Il y'a deux applications faites à partir des énergies solaires à savoir celle des systèmes isolés et celle des systèmes raccordés au réseau électrique.

### I.2.1.2. Energie éolienne

C'est l'énergie produite par les aérogénérateurs qui sont mis en mouvement par le vent. Il y'a deux principales applications qui sont utilisées pour augmenter l'accès énergétique et l'atténuation des GES effets:

- éolienne terrestre (one shore) ;
- éolienne marine, au large des côtes (offshore).

Aujourd'hui, il existe plusieurs gammes de puissance disponible sur le marché (voir Figure 6) [1].

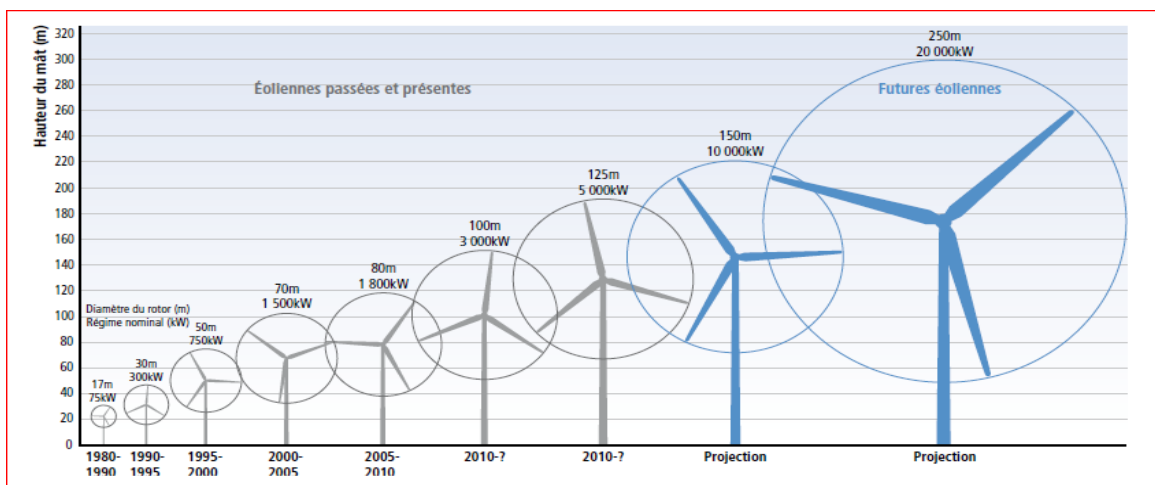


Figure 6: Augmentation de la taille moyenne des éoliennes commercialisées [1].

Ces puissances peuvent être classées selon leurs emplois :

Tableau 2: Classification des systèmes éoliens [1]

Puissance installée	Classification
< 1 kW	Système éolien micro
1 à 100 kW	Système éolien maison
100 kW à 10 MW	Système éolien autonome
>10 MW	Système éolien industriel

### I.2.1.3. Bioénergie

La bioénergie est une forme d'énergie qui provient du processus de valorisation énergétique de la biomasse. Elle peut être fabriquée à partir de plusieurs résidus d'origine agricoles et de l'élevage tels que :

- Plantations forestières à rotation rapide ;
- Résidus de récolte;
- Fractions organiques des déchets urbains solides (boue de vache, volaille etc.).

Les technologies bioénergétiques disponibles sur le marché sont très nombreuses [1] ; parmi lesquelles on peut citer :

- Chaudières de petite ou grande capacité ;
- Systèmes de chauffage domestique à base de granulés ;
- Production d'éthanol à partir de sucre ou d'amidon ;
- Carburants à base de lignocelluloses.

### I.2.1.4. Energie hydroélectrique

C'est l'énergie produite par l'exploitation de la force motrice de l'eau pour générer de l'électricité. Les technologies utilisées pour atténuer les GES et faciliter l'accès énergétique à la population mondiale sont très diversifiées :

- Barrages-réservoir ;
- Centrales d'éclusées ou au fil de l'eau;
- Centrales dans le courant.

La puissance dépend du débit de l'eau qui s'écoule et de la hauteur de chute. Les gammes de puissances qui existent sur le marché sont présentées dans le tableau 3 [1].

Tableau 3: technologies et leurs gammes de puissances disponible [1]

Technologies	Puissance produite (kW)
Pico-centrales	< à 20
Micro-centrales	20 < P < 500
Mini-centrales	500 < P < 2000
Petites centrales	2000 < P < 10000
Grandes centrales hydroélectriques	>10000

### **I.2.1.5. Energie géothermique**

C'est l'énergie disponible à l'intérieur de la Terre. Elle est produite à partir de la chaleur extraite des réservoirs géothermiques au moyen de puits le plus souvent [1].

Parmi les offres que fournit cette technologie on peut citer quelques :

- Chauffage urbain ;
- Pompe à chaleur géothermique (chauffage ou refroidissement).

### **I.2.1.6. Energie marine**

C'est l'énergie électrique qui provient de l'énergie potentielle, cinétique, thermique et chimique de l'eau de mer. Les technologies utilisées pour réduire les GES sont très variées :

- Centrales marémotrices ;
- Turbines sous-marines (marées et les courants océaniques qui sont pour la production de l'électricité);
- Echangeur de chaleur (transformation de l'énergie thermique des océans).

## **I.3. Energies renouvelables et Changement climatique**

Les énergies renouvelables jouent un rôle d'atténuation très important des GES.

### **I.3.1. Potentiel d'atténuation du changement climatique par les énergies renouvelables**

Les énergies renouvelables présentent un pouvoir d'atténuation très élevé estimé par des scénarios respectifs à 220 et 560 Gt CO<sub>2</sub> [1]. De même au Sénégal, ces projets installés vont permettre d'éviter l'émission de 340000 tonnes de CO<sub>2</sub> par an [4]. Pour renforcer ce pouvoir d'atténuation, il est nécessaire de viser des objectifs plus ambitieux tels que le mix énergétique.

### **I.3.2. Intégration des énergies renouvelables dans le bâti**

Elle est une technologie proposée car elle garantit l'autonomie ou l'autoconsommation en électricité. Elle évite les désagréments du réseau électrique et peut réduire considérablement les coûts de facturation électrique élevés ainsi que les GES d'origine électrique.

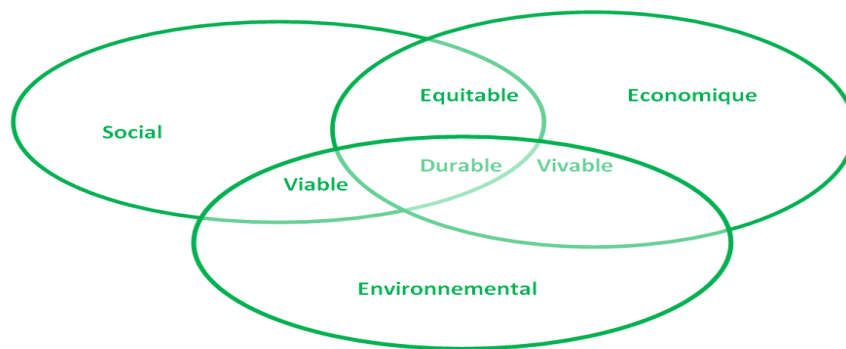
### **I.3.3. Energies renouvelables dans le contexte du développement durable**

Dans les débats de la Conférence des parties (COP22) tenu à Marrakech le 18 novembre 2016, Nicolas Haeringer de l'ONG 350.org affirme «Zéro fossile, 100 % renouvelable, c'est notre lutte, c'est notre horizon ».

C'est dans ce sens que quelques mesures peuvent être prises :

- 1 Litre d'essence économisé permet d'éviter 2,28 kg de CO<sub>2</sub> équivalent ;
- 1 Litre de mazout économiser permet d'éviter 2,6 kg de CO<sub>2</sub> équivalent ;
- 1 kWh produit en solaire permet d'économiser de 0,01 à 0,99 kg de CO<sub>2</sub> équivalent.

Donc ces énergies renouvelables peuvent contribuer au développement économique, social et environnemental qui forment le noyau du développement durable (voir Figure 7).



**Figure 7: illustration du développement durable**

#### **I.4. Politique et potentiel des énergies renouvelables au Sénégal**

Depuis les années 1980, le Sénégal s'est engagé avec une volonté politique bien exprimée pour développer les énergies renouvelables. Cette volonté est d'ordre législatif et réglementaire établie par des lois.

##### **I.4.1. Aspect politiques et institutionnels**

En Juin 1981, la loi n° 81-22 instituant sur les avantages fiscaux dans le domaine de l'utilisation des énergies renouvelables est établie. En avril 1998, le cadre institutionnel est renforcé par la création de l'Agence Sénégalaise d'Électrification Rurale (ASER). Malgré ces aspects institutionnels, le secteur n'a pas pris une évolution significative. C'est après la crise énergétique des années 2000, que le secteur a réellement commencé à prendre une ampleur avec le renforcement de la volonté politique.

Malgré cette volonté bien exprimée, des études expérimentales sont nécessaires pour approuver la disponibilité du potentiel.

##### **I.4.2. Potentiel et puissance installée**

Selon des études menées par l'atlas solaire mondial sur le potentiel solaire et ceux du Centre d'Etude et de Recherche en Energie Renouvelable (CERER) et l'Ecole Supérieure Polytechnique (ESP) de Dakar sur le potentiel éolien ; le Sénégal dispose d'importantes potentialités dans le domaine des énergies renouvelables.

Les puissances installées sont aussi variées d'une technologie renouvelable à l'autre. Celles-ci s'expliquent d'une part par la disponibilité du potentiel et d'autre par l'obtention de la technologie. Ainsi, le potentiel et les puissances installées dans le domaine de l'énergie solaire et éolienne sont présentés dans la suite.

#### I.4.2.1. Potentiel Solaire et puissance installée

Le Sénégal dispose d'un potentiel d'ensoleillement pratiquement répartie sur toute son étendue pour une irradiation variant du Sud-Est au Nord-Est entre 1850 et 2250 KWh/m<sup>2</sup>/an (tableau 4). Selon l'atlas solaire mondial, il est considéré comme l'un des pays les plus ensoleillés avec un ensoleillement moyen de 5,8 kWh/m<sup>2</sup>/J (Figure 8) [12]. Dans cette figure, les zones qui se situent vers l'Est sont plus ensoleillées avec des valeurs supérieures à la moyenne.

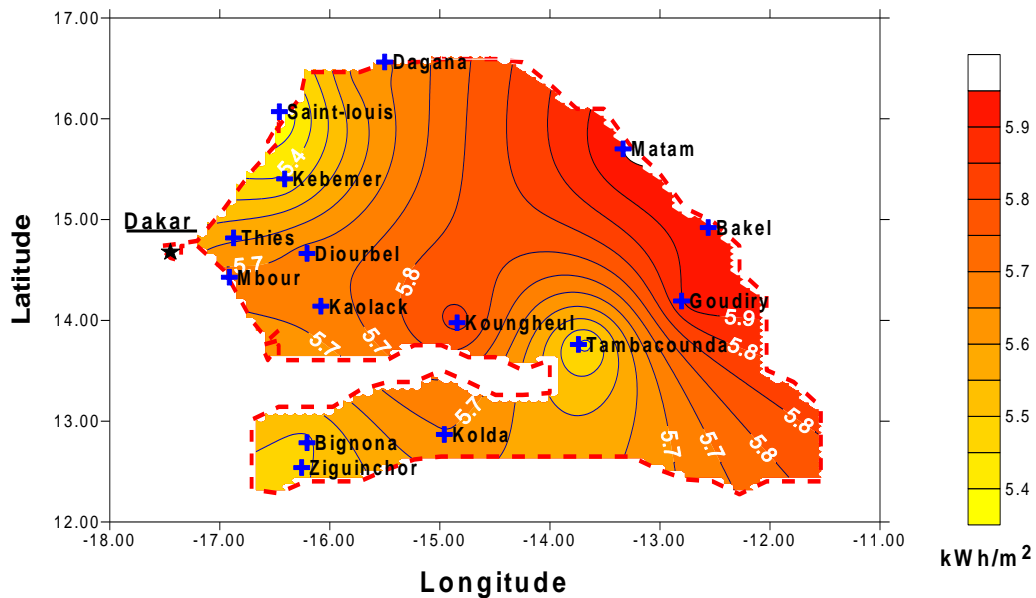


Figure 8: répartition globale de l'irradiation spatiale du Sénégal [12]

Ainsi, dans le tableau 4, les irradiances globales des grandes villes sont aussi présentées [12].

**Tableau 4: Irradiance globale de certaines grandes villes du Sénégal [12]**

Ville	Inclinaison optimale	Irradiance globale par an
Saint Louis	15°	2140 kWh/m <sup>2</sup>
Matam	15°	2030 kWh/m <sup>2</sup>
Thiès	15°	2130 kWh/m <sup>2</sup>
Dakar	15°	2270 kWh/m <sup>2</sup>
Touba	14°	2060 kWh/m <sup>2</sup>
Mbour	14°	2210 kWh/m <sup>2</sup>
Kaolack	14°	2080 kWh/m <sup>2</sup>
Tambacounda	15°	2070 kWh/m <sup>2</sup>
Kolda	14°	2110 kWh/m <sup>2</sup>
Ziguinchor	14°	2210 kWh/m <sup>2</sup>

Les puissances interconnectées au réseau de la SENELEC dans le domaine des énergies solaires sont représentées dans le tableau 5 [4].

**Tableau 5: Centrales promoteur [4]**

Centrales Promoteur	Type	Puissances installées MW	Année de mise en service
<b>Senergy I</b>	PV	30	2017
<b>Senergy II</b>	PV	20	2016
<b>Kima Solaria</b>	PV	20	2016
<b>Ten Merina</b>	PV	29	2017
<b>EDS-Eximag</b>	PV	20	2017
<b>Energy-Ressource</b>	PV	20	2017
<b>DIAS EPC of KFW</b>	PV	15	2017
<b>Scaling Solar Kael</b>	PV	23	2018
<b>Scaling Solar Kaone</b>	PV	30	2018
<b>Scaling Solar Niakhar</b>	PV	47	2018
<b>Appel d'offre IPP</b>	PV	50-100	2017
<b>Central PV(Clients BT)</b>	PV	20	2017
<b>Malicounda</b>	PV	31	2017
<b>Bokhol</b>	PV	20	2017
<b>Totale</b>	PV	425	FIN 2018



Aujourd'hui, 122 MW sont connectés au réseau de la SENELEC. Pour l'autoconsommation et l'autonomisation électrique dans les bâtiments publics des avancés ont été fait selon l'ANER. Il y'a respectivement quatre (4) mini centrales solaires PV de 600 kWc cumulées sans stockage intégré au réseau pour le fonctionnement de quatre hôpitaux et une mini centrale solaire PV de 25 KWc avec stockage de 25 kWh pour la Gouvernance de la région de Ziguinchor [3].

#### I.4.2.2. Potentiel Eolien et puissance installée

Le centre d'études et de recherches en énergies renouvelable (CERER) et l'équipe de l'école supérieure polytechnique ont permis d'établir le potentiel éolien dans plusieurs zones du Sénégal. Le long du littoral Nord-Ouest entre Dakar et Saint-Louis, les études montrent des vitesses de vents de 4 à 5 m/s. A 50 m du sol, on peut obtenir des vitesses de vent allant jusqu'à 6 m/s. Ce potentiel est aussi observé le long des rives du fleuve Sénégal, dans les îles du delta du Saloum, et ainsi que dans la zone du Sud-Est (3 à 4 m/s). La carte ci-dessous présente une vue d'ensemble du potentiel disponible au Sénégal (figure 9) [12]. Les vitesses de vents sont plus intéressantes le long des côtes sénégalaises. En effet, ces zones sont plus exposées aux alizés provenant de l'océan.

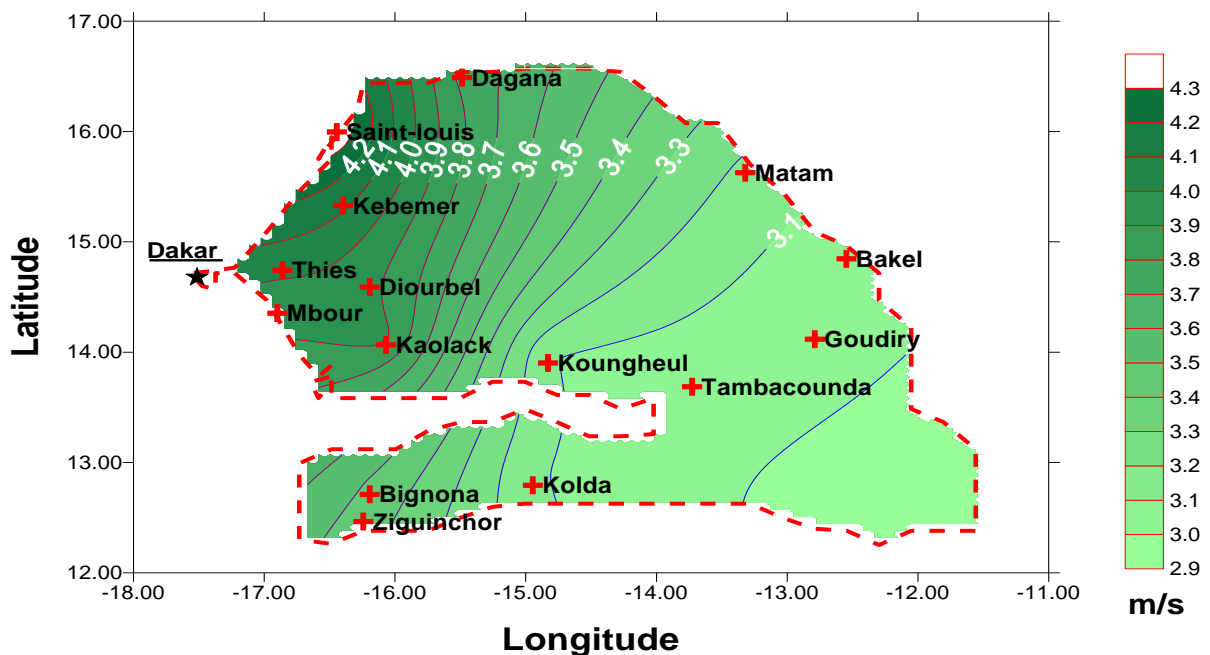


Figure 9: Carte préliminaire de vitesses moyennes du vent à 10m [12].

Le tableau 6 présente les puissances en éoliennes développées au Sénégal [4].

**Tableau 6: Centrales promoteur en éoliennes [4]**

<b>Centrales promoteur</b>	<b>Type</b>	<b>Puissances installées (MW)</b>	<b>Année de mise en service</b>
<b>Sarreole I</b>	Eolienne	50	2017
<b>Sarreole II</b>	Eolienne	50	2018
<b>Sarreole III</b>	Eolienne	50	2019
<b>Ferme Ndiaye</b>	<b>Taïba</b> Eolienne	150	2019-2021
<b>Totale</b>	Eolienne	300	

Si toutes ces sources sont injectées au réseau de la Senelec, le taux de l'énergie renouvelable dans le mix énergétique sera d'environ 30 % [3].

### **Conclusion**

Malgré la vulnérabilité des pays du sud, les émissions de GES contribuant au phénomène du réchauffement climatique sont beaucoup plus importantes dans les pays développés. Les pays industrialisés qui représentent 20 % de la population mondiale, contribuent à hauteur de 75 % aux émissions historiques de GES (Den Hartigh, 2009) et l'Afrique pollue que 2,5 %. Mais dans les accords de Paris pendant la conférence des parties, les pays Africains ont été appelés à faire leurs bilans d'émissions des GES annuels pour enfin développer des mécanismes de réduction. Pour accompagner les pays en voie de développement, particulièrement le Sénégal, à l'atténuation des émissions de GES une implication totale de nos chercheurs universitaires demeure nécessaire. C'est ainsi qu'une première estimation des émissions liées à la consommation électrique est réalisée dans le cadre de cette proposition de solutions d'énergie renouvelable aux structures de la Mairie.

## Chapitre II : Bilan carbone de la Mairie de Ziguinchor

### Introduction

Aujourd'hui, le Sénégal est confronté à des enjeux énergétiques et climatiques liés à la démographie d'une part et d'autre part à la surconsommation électrique faite dans les bâtiments administratifs. Ainsi, pour lutter contre le gaspillage énergétique qui entraîne l'augmentation des émissions de GES, la réalisation du bilan carbone est établie dans ce chapitre. C'est une pratique qui peut conscientiser nos responsables pour l'abandon progressif des énergies fossiles à faible qualité environnementale. Ceci favorisera une transition vers les énergies renouvelables.

### II.1. Présentation de la région de Ziguinchor

La commune de Ziguinchor couvre une superficie de 34000 Ha ; représentant 3,73 % du territoire national. Elle est limitée au Nord par la République de Gambie, au Sud par la République de Guinée Bissau, à l'Est par les régions de Kolda et Sédhiou et à l'Ouest par l'Océan Atlantique. Elle est localisée à la latitude 12,6°N et longitude 16,3°W (figure 10).

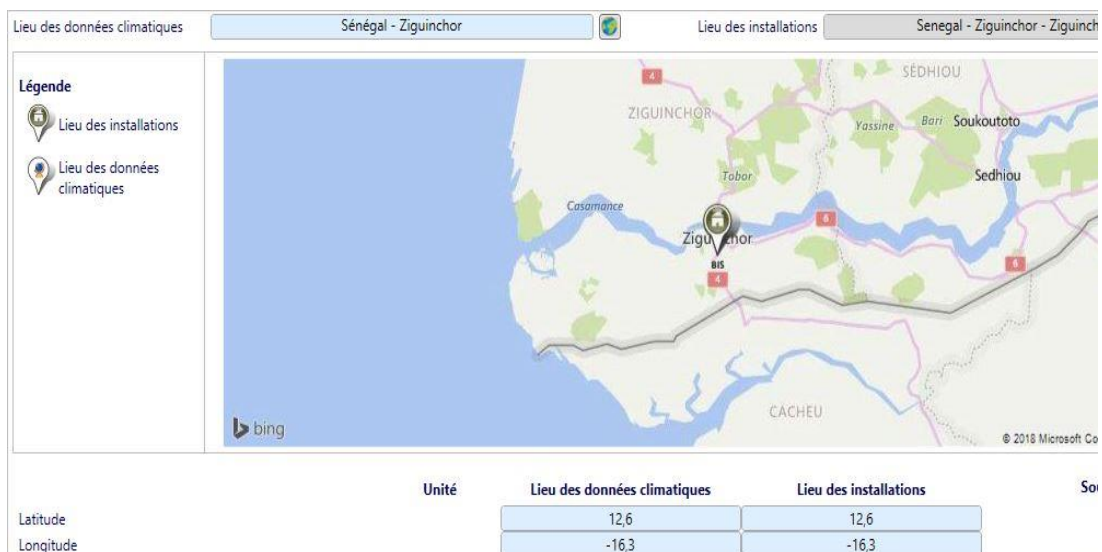


Figure 10 : Localisation physique de la région de Ziguinchor

### II.2. Mairie de Ziguinchor

La région de Ziguinchor a été érigée en commune en 1907. Sa population était estimée à plus de 200000 habitants en 2017. Ainsi, elle a plusieurs domaines de compétences (voir figure11).

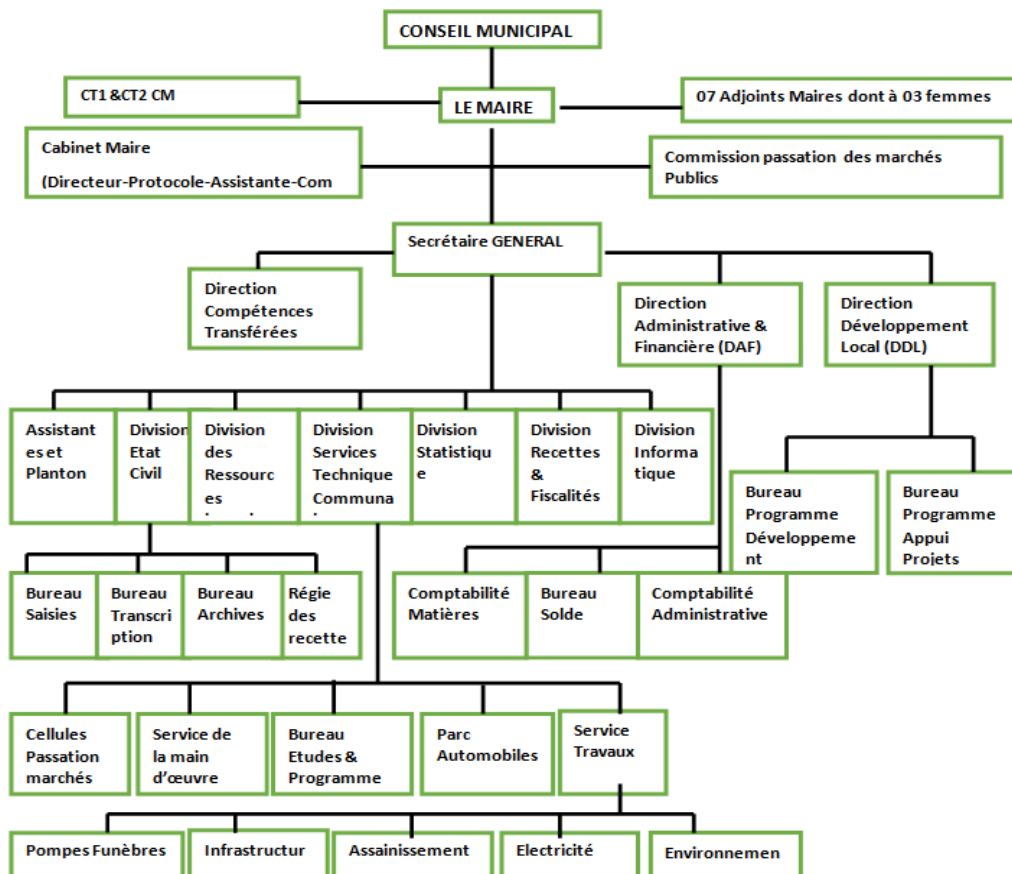


Figure 11: Organigramme des compétences de la Mairie

### II.2.1. Présentation des Structures d'études

Les structures d'étude sont représentées sur la figure 12. Elles sont au nombre de quatre :

- La VOIRIE, la structure d'accueil lors du stage, est le bras droit technique de la mairie. C'est la Direction des Espaces Verts et de l'environnement. Elle surveille et contrôle les espaces publics Pour lutter contre l'occupation anarchique.
- La Recette et Perception Municipale (RPM) qui s'occupe de la collecte de fonds obtenus lors des taxes payées par les occupants des lieux publics comme les marchés, etc.
- L'Ancienne Mairie et la nouvelle Mairie s'occupent des affaires administratives des personnes résidentes dans la localité.



**Figure 12: Carte de localisation des structures de la zone d'étude**

### **II.3. Variabilités climatiques de la région**

La région de Ziguinchor présente un climat tropical caractérisé par une saison des pluies d'une durée variable du Nord au Sud (3 à 4 mois) et une saison sèche le reste de l'année (novembre à juin). Les variables climatiques de la zone étudiée sont :

- Humidité et pluviométrie
- Vitesses du vent et rayonnement solaire.

#### **II.3.1. Humidité et Pluviométrie**

L'humidité ainsi que la pluviométrie sont présentées dans la figure 13. Ces données sont fournies par la Nasa à partir du logiciel RETScreen. Dans ce graphe, l'humidité augmente avec la pluie. Elle est plus accentuée pendant le mois d'Août. En effet, c'est le mois le plus pluvieux où les masses d'air contiennent plus d'eau.

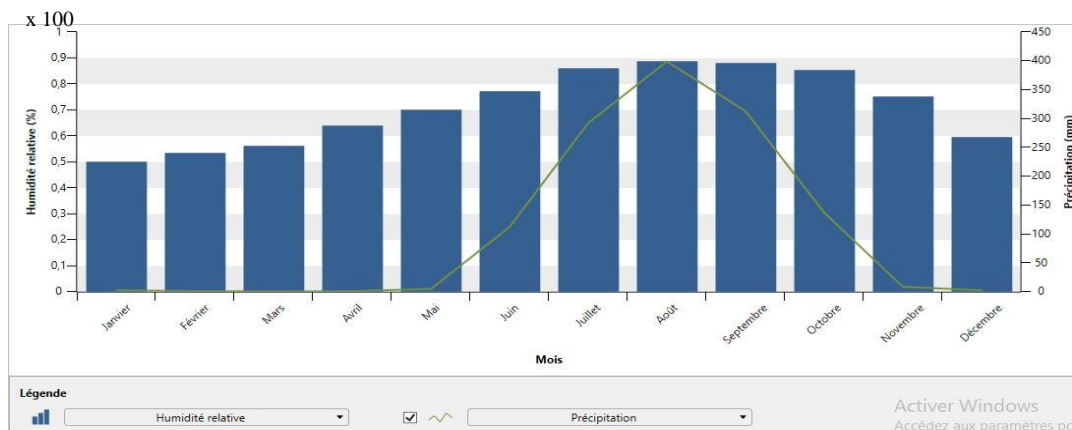


Figure 13: Variation moyenne de la pluviométrie et l'humidité de la région de Ziguinchor

### II.3.2. Vitesse du vent et rayonnement solaire

Les données présentées sur la figure 14 sont des données satellitaires obtenues à partir de RETScreen. De janvier à juin une forte production en énergies solaires et éolienne peut être attendue. Cependant, ce sont des périodes où la vitesse du vent ainsi que le rayonnement augmentent au cours du temps. Pour les mois d’Août à Novembre la production éolienne peut diminuer. En effet, la vitesse du vent est très faible.

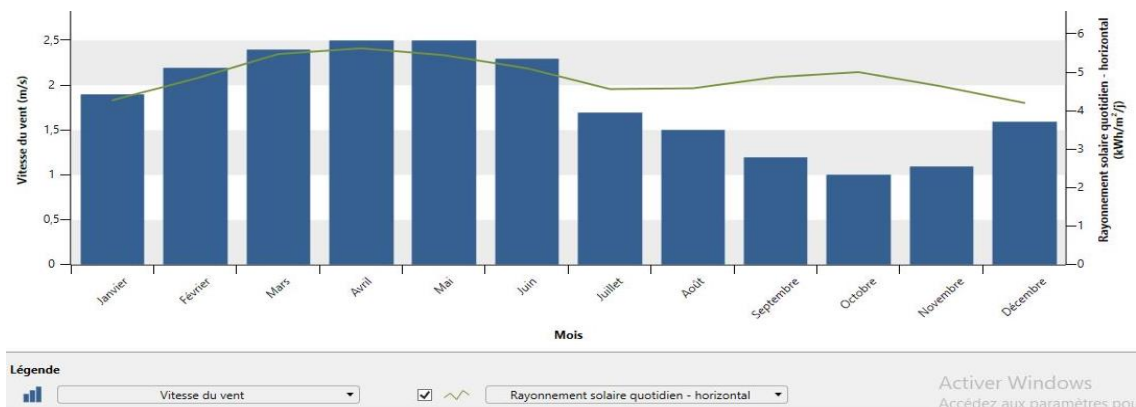


Figure 14: Variation moyenne mensuelle de l'ensoleillement et de la vitesse du vent

Ces paramètres météorologiques sont intéressants dans la région pour le développement des énergies solaires et éoliennes malgré qu'ils soient moins intéressants à certaines périodes. Ainsi, dans la suite nous allons établir les consommations électriques des structures d'études.

### II.4. Bilan de puissance électrique

Le bilan de puissance est une étape indispensable dans une installation électrique. Il prend en compte la totalité des puissances des équipements électriques installés et leur utilisation. Il permet d'établir la consommation journalière, les profils de charges et le bilan carbone.

#### II.4.1. Relevé de la caractéristique des charges

Le stage pour la collecte des données a été réalisé aux structures de la Mairie de Ziguinchor pour une durée de 2 mois (Août et septembre) et celui de la recherche au laboratoire du CIFRES (Centre International de Formation et de Recherche en Energie Solaire) de ESP (Ecole Supérieur polytechnique) de Dakar. Pour réaliser cette tâche, nous nous sommes rendus dans chaque structure pour relever les appareils qui y sont présents, leurs puissances ainsi que leurs heures de fonctionnement afin de pouvoir établir la consommation. Cette dernière est donnée par l'expression (1).

$$E = P * \Delta t \text{ Avec } \Delta t \text{ en heures. (1)}$$

Tous les appareils utilisés seront présentés dans la suite de notre étude.

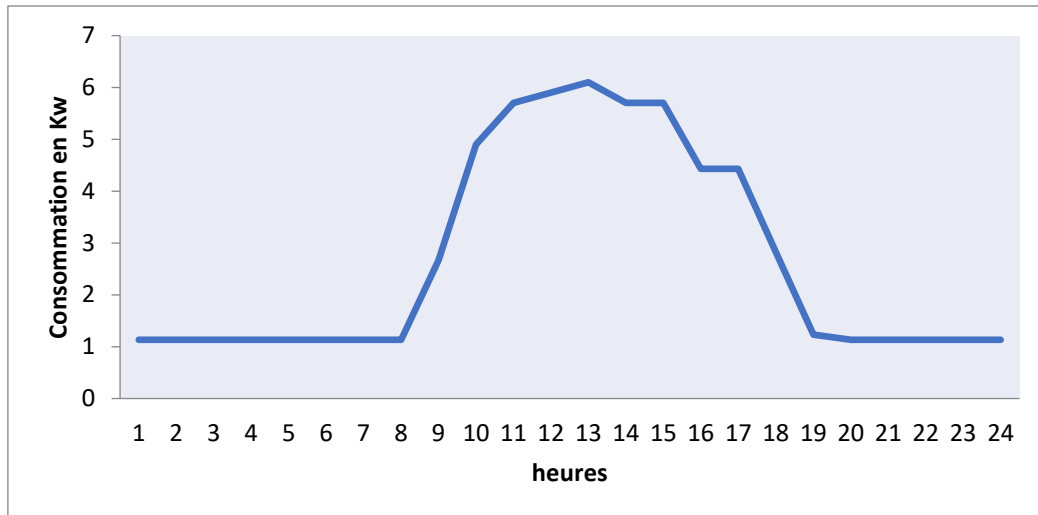
##### II.4.1.1. Consommation VOIRIE

Dans la VOIRIE, il y'a plusieurs équipements électriques qui sont présentées dans le tableau 7. Ce tableau présente le bilan de puissance et la consommation journalière dans la structure qui sont respectivement de 10,541 kW et 64,331 kWh. Parmi ces équipements certains ne fonctionnent plus mais des sources ont confirmé qu'ils fonctionnaient en 2017 l'année de référence du bilan. Dans cette structure, la facture d'électricité délivrée par la SENELEC est estimée pour une consommation journalière à 58 kWh/j.

**Tableau 7: Bilan de puissance et la consommation journalière de la VOIRIE**

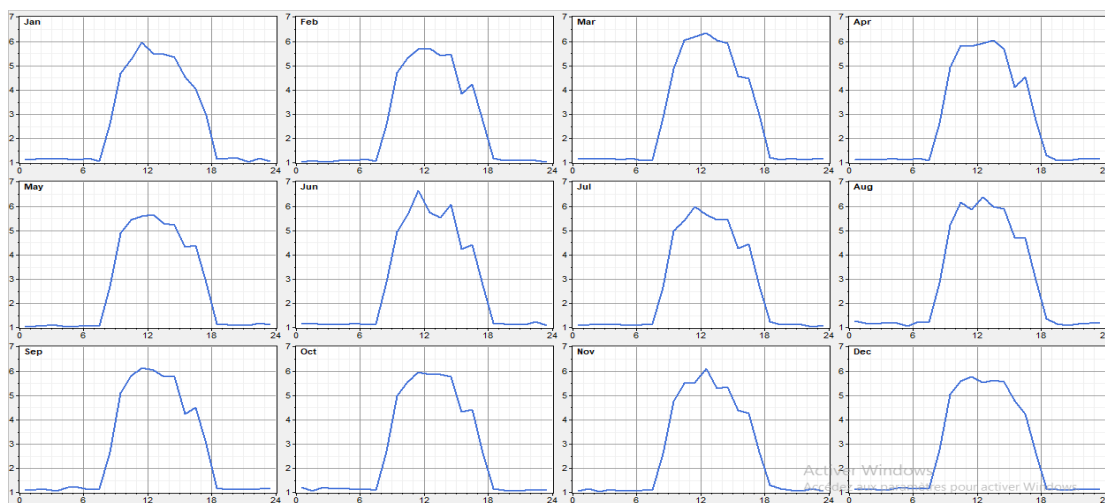
APPAREILS VOIRIE	Quantités	Puissances Unitaires (watts)	Puissances Totales	Energies consommées (Wh)
Ampoules	4	150	600	3700
Néons	15	36	540	4320
Radio	1	5	5	30
WIFI	1	5	5	168
Ordinateurs	2	150	300	3000
Pc Portable	2	120	240	1200
imprimante	1	300	300	150
Réfrigérateur	1	200	200	2600
Congélateur	1	250	250	3600
Ventilateur	1	60	60	200
Climatisation	4	2000	8000	43923
Autres appareil	1	50	50	1440
<b>TOTAL</b>	<b>34</b>	<b>3326</b>	<b>10549</b>	<b>64331</b>

Pour bien voir la consommation de la structure, les figures 15 et 16 présentent la distribution horaire ainsi que mensuelle de la demande énergétique globale. Pour le profil de charge journalière, l'augmentation de la consommation entre 8h et 18h est due au fonctionnement des climatiseurs pendant les heures de travail. En fin de journée tous les employés rentrent chez eux ce qui explique une forte diminution de cette consommation.



**Figure 15: Profil de charge journalier de la VOIRIE**

Pour le profil mensuel des pics sont obtenus vers 10h et 12h. On constate qu'ils sont plus accentués aux mois de juin et août. Ceux-ci pourraient être dû à l'utilisation en masse de la climatisation d'une part en période de chaleur (Juin) et d'autre part aux coupures notées pendant les périodes de forte pluie (Août). En effet, la pluie peut causer une baisse ou une hausse de tension qui impacte directement la puissance [13].



**Figure 16: Profil de charge mensuel de la VOIRIE**

#### II.4.1.2. Consommation Ancienne Mairie

Dans cette structure la puissance ainsi que la consommation est beaucoup plus importante que la précédente parce qu'il y'a plus de bureaux et de personnels. Les équipements électriques sont beaucoup plus importants par rapport à la VOIRIE (tableau 8). Le tableau 8 présente le bilan de puissance et la consommation journalière de la structure qui sont respectivement de 19,336 kW et 72,964 kWh.



**Tableau 8: Bilan de puissance et la consommation journalière de l'ancienne Mairie**

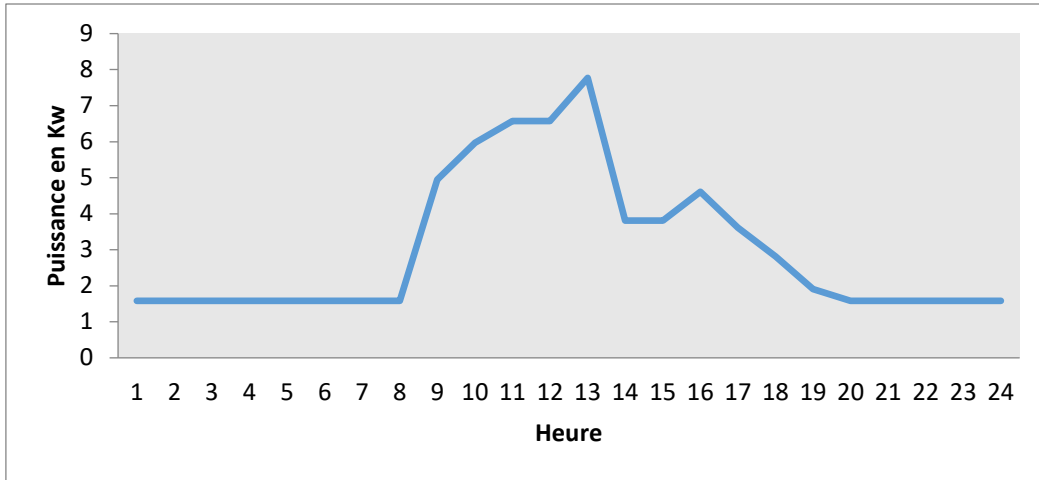
<b>APPAREILS Ancienne Mairie</b>	Quantités	Puissances Unitaires (watts)	Puissances Totales	Energies consommées (Wh)
Ampoules	4	60	240	2880
Néons	43	36	1548	6372
Radio	1	10	10	60
WIFI	4	7	28	672
Ordinateur de Bureau	9	120	1080	5380
Pc Portable	2	90	180	2160
imprimante	5	200	1000	1000
Réfrigérateur	3	200	600	9600
TV + Décodeur	2	150	300	1200
Ventilateur	1	60	40	300
Chauffe eau	5	600	3000	1800
Climatisation	9	1230	11070	38000
Ventilateurs	6	60	340	3240
Autre appareil	10	36	360	300
<b>TOTAL</b>	<b>107</b>	<b>2859</b>	<b>19336</b>	<b>72964</b>

La facture de la SENELEC se fait par 56 jours dans cette structure illustrée au tableau 9. En effet, les mois colorés en vert sont les valeurs issus de la SENELEC et les autres déduit par des calculs en tenant compte des taxes communales (2,5 %), la Redevance (variable) et aux Taxes de Valeurs Ajoutées (TVA 18 %). En prenant les mois de Août et Septembre ou la consommation est plus importante; on évalue à 63,25 kWh celle journalière. La différence entre la consommation obtenue à partir du bilan et celle facturée pourrai être due aux puissances nominales des appareils qui sont utilisées.

**Tableau 9: Facturations délivrées par la SENELEC**

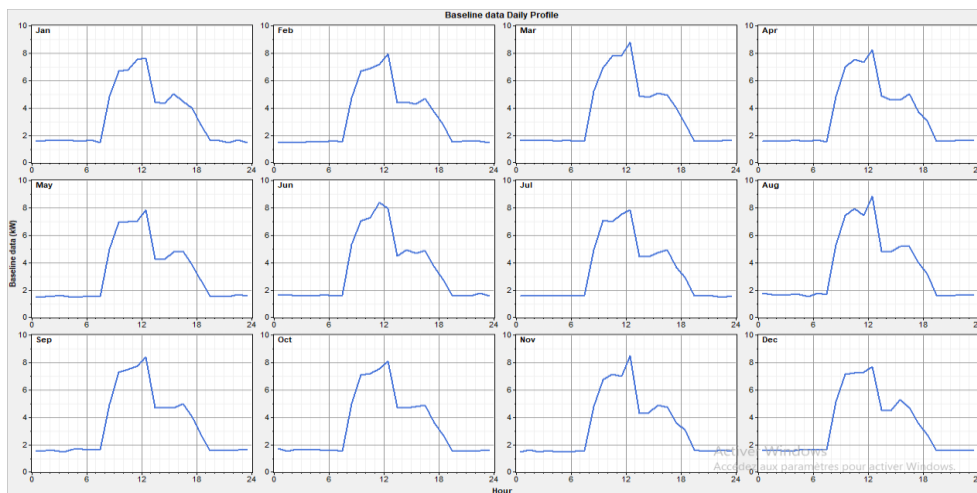
Mois	Consommation KWh	Montant consommation FCFA
Décembre-janvier	1142	163 883
Juin-juillet	2637	386 997
Août-septembre	3542	522 019
Octobre-novembre	2578	378 276
Février-mars	1336	192 846
Avril-mai	1711	248 729
<b>Total</b>	<b>12946</b>	<b>1 892 750</b>

Les profils de charges représentant la distribution horaire ainsi que mensuelle de la demande énergétique globale sont représentés dans les figures 17 et 18. Presque le même profil de charge que la VOIRIE mais seulement que les activités sont plus concentrés entre 8h et 13h, et une pause entre 13h et 15h marquée par une baisse de consommation. En 15h et 18h on assiste à la reprise de certains employés entraînant une augmentation de la consommation.



**Figure 17: Profil de charge journalier de l'ancienne Mairie**

Au niveau des profils de charge mensuelle on note une corrélation avec les heures de pics et la consommation journalière.



**Figure 18: Profil de charge mensuel de l'ancienne Mairie**

#### II.4.1.3. Consommation de la Recette et Perception Municipale (RPM)

La consommation des équipements électriques est présentée dans le tableau 10. Il présente le bilan de puissance et la consommation journalière de la structure qui sont respectivement 20,641kW et 96,713 kWh.

**Tableau 10: Bilan de puissance et la consommation journalière Recette et Perception Municipal**

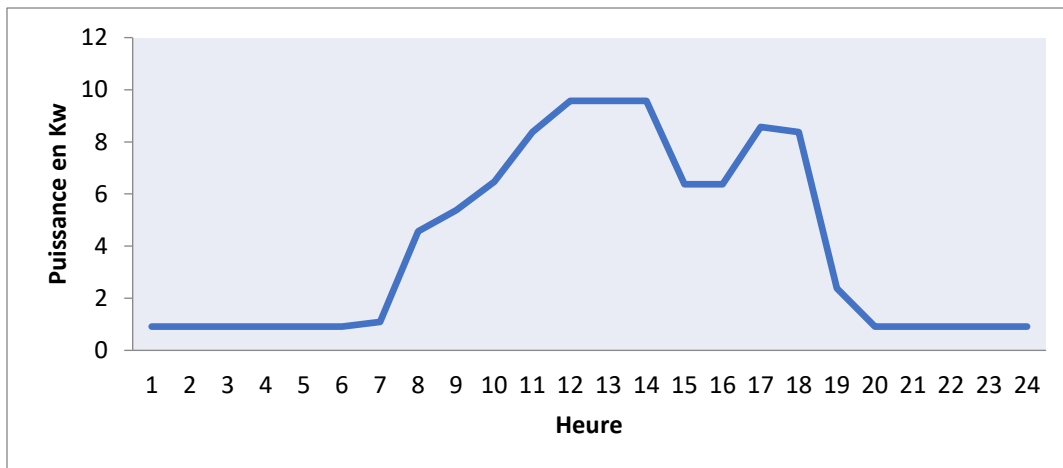
APPAREILS Perception municipal	Quantités	Puissances Unitaires (watts)	Puissances Totales	Energies consommées (Wh)
Ampoules	4	60	240	2880
Néons JOURS	21	36	756	5975
Néons NUITS	6	36	216	2592
Radio	1	5	5	30
WIFI	2	7	14	336
Ordinateur de Bureau	13	120	1560	9680
Pc Portable	2	60	120	120
Grande imprimante	1	600	600	300
Réfrigérateur	5	200	1000	18000
TV + Décodeur	2	40	80	640
Ventilateur	7	60	420	840
Cafetier	2	1000	2000	1000
Climatisation	11	1230	13530	54120
Autre appareil	20	5	100	200
<b>TOTAL</b>	<b>99</b>		<b>20641</b>	<b>96713</b>

La facturation de la SENELEC se fait par 63 jours dans cette structure comme illustrée au tableau 11. Les mois colorés en vert sont des valeurs obtenues par la facture de la SENELEC. Pour les autres, elles sont déduites par des calculs en tenant compte des taxes communales (2,5 %), la Redevance (variable) et en fin aux Taxe de Valeurs Ajoutées (TVA 18 %). En prenant les mois les plus défavorables la consommation moyenne journalière de la structure peu est être évaluée à 87 kWh.

**Tableau 11: les facturations délivrées par la SENELEC pour la RPM**

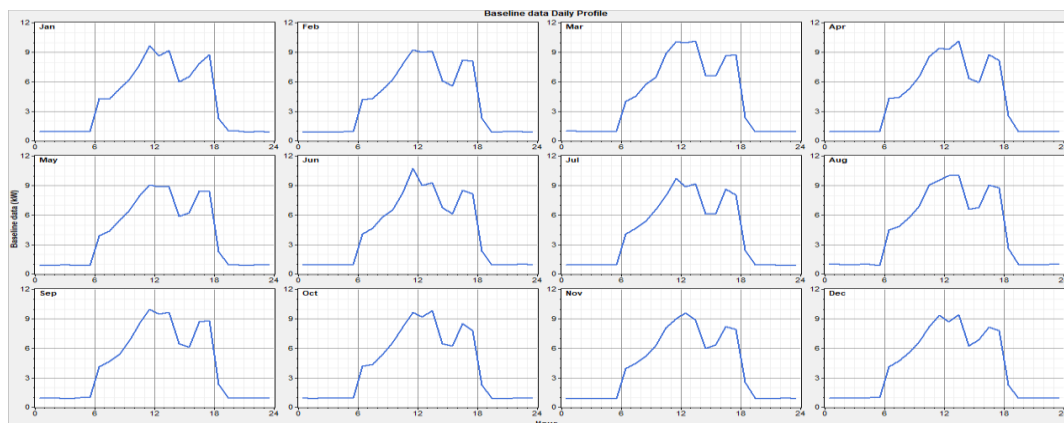
Mois	Consommation KWh	Montant consommation FCFA
Août-septembre	5453	806 426
Octobre-novembre	4171	615 108
Décembre-janvier	2889	423 790
Février-mars	3077	451 827
Avril-mai	3305	485 927
Juin-juillet	2237	326 448
<b>Totale</b>	<b>21 132</b>	<b>3 109 526</b>

Ainsi les profils de charge représentant la distribution horaire ainsi que mensuelle de la demande énergétique globale sont représentés dans les figures 19 et 20. Pendant la pause entre 14h30 et 15h la climatisation ainsi que les réfrigérateurs sont en marche pour la majorité des bureaux.



**Figure 19: Profil de charge journalier de la Recette et Perception Municipale**

Pour les profils de charge mensuels nous avons les mêmes variations que les profils de charges journaliers.



**Figure 20: Profil de charge mensuel Recette et Perception Municipale**

#### II.4.1.4. Consommation Nouvelle Mairie

C'est la structure la plus importante et regroupant le plus de bureaux y compris les bureaux du Maire. Elle fut la plus difficile pour l'établissement du bilan de puissance car ayant des bureaux dont l'accès n'est pas permis aux étrangers. Par ailleurs, la structure est dotée d'une puissance souscrite, un système Back up et une salle de célébration de mariage qui se tient tous les Samedi. Une session ordinaire est aussi tenue 3 fois par an dans la structure rendant l'établissement du bilan de puissance encore plus difficile. Malgré ces obstacles nous avons obtenu tous les équipements électriques dont dispose la structure par l'aide des agents. Mais les heures de fonctionnement de certains appareils n'étaient pas obtenues. Dans le bilan on les a mis dans la même fourchette que les autres appareils. Ceci est détaillé dans le tableau 12. Il présente le bilan de puissance et la consommation journalière de la structure qui sont respectivement 67,706 kW et 320,459 kWh.

**Tableau 12: Bilan de puissance et la consommation journalière de la Nouvelle Mairie**

<b>APPAREILS Nouvelle Mairie</b>	<b>Quantités</b>	<b>Puissances Unitaires (watts)</b>	<b>Puissances Totales</b>	<b>Energies consommées (Wh)</b>
Ampoules	47	10	470	5640
Néons JOURS	100	36	3600	12640
Néons NUITS	26	36	936	9360
Projecteurs	8	150	1200	10400
WIFI	5	7	35	840
Ordinateur de Bureau	36	120	4320	26180
Pc Portable	12	60	720	720
Imprimante	2	300	600	300
Réfrigérateur	8	200	1600	26400
Scanner	1	300	300	150
TV + Décodeur	5	41	205	820
Ventilateur	4	60	240	1200
Chauffe eau	3	2000	6000	3000
Climatisation	33	1230	40590	218959
Souffleur	1	500	500	250
Cafetier	6	1000	6000	3000
Autre appareil	20	15	300	600
<b>TOTAL</b>	<b>318</b>	<b>6065</b>	<b>67706</b>	<b>320459</b>

La facturation de la SENELEC se fait par 31 jours dans cette structure illustrée au tableau 13. La consommation journalière moyenne est de 283 kWh/j. On note une différence entre la consommation obtenue par le bilan de puissance et celle facturée. En effet, elle est due à la puissance souscrite et aux puissances nominales utilisées lors du bilan.

**Tableau 13: la facturation délivrée par la SENELEC pour la Nouvelle Mairie**

<b>Mois</b>	<b>Consommation KWh</b>	<b>Montant consommé</b>
<b>Janvier</b>	<b>2840</b>	<b>309 172</b>
<b>Février</b>	<b>6220</b>	<b>668 761</b>
<b>Mars</b>	<b>6519</b>	<b>698 363</b>
<b>Avril</b>	<b>8769</b>	<b>920 613</b>
<b>Mai</b>	<b>5675</b>	<b>591 834</b>
<b>Juin</b>	<b>5966</b>	<b>621 944</b>
<b>Juillet</b>	<b>6343</b>	<b>669 246</b>
<b>Août</b>	<b>5763</b>	<b>600 923</b>
<b>Septembre</b>	<b>5102</b>	<b>532 601</b>
<b>Octobre</b>	<b>6080</b>	<b>633 709</b>
<b>Novembre</b>	<b>8379</b>	<b>880 309</b>
<b>Décembre</b>	<b>8481</b>	<b>890.894</b>
<b>Totale</b>	<b>76137</b>	<b>8 009 369</b>

Les profils de charges représentant la distribution horaire ainsi que mensuelle de la demande énergétique globale sont représentés dans les figures 21 et 22. Presque, le même profil de charge que les autres structures précédentes. Par contre, la baisse de la consommation est plus

s'accroît pendant l'après-midi. La consommation est plus importante pendant la nuit que dans les autres structures. Celle-ci s'explique par le fonctionnement de la climatisation pendant toute la nuit dans certains bureaux. Par contre, le pic de 13 h peut être dû à l'heure de pause qui est prolongée parfois jusqu'à 13h 30 dans la structure. Tandis que, la baisse progressive de la consommation après la pause pourrait être due à la descente de certains employés.

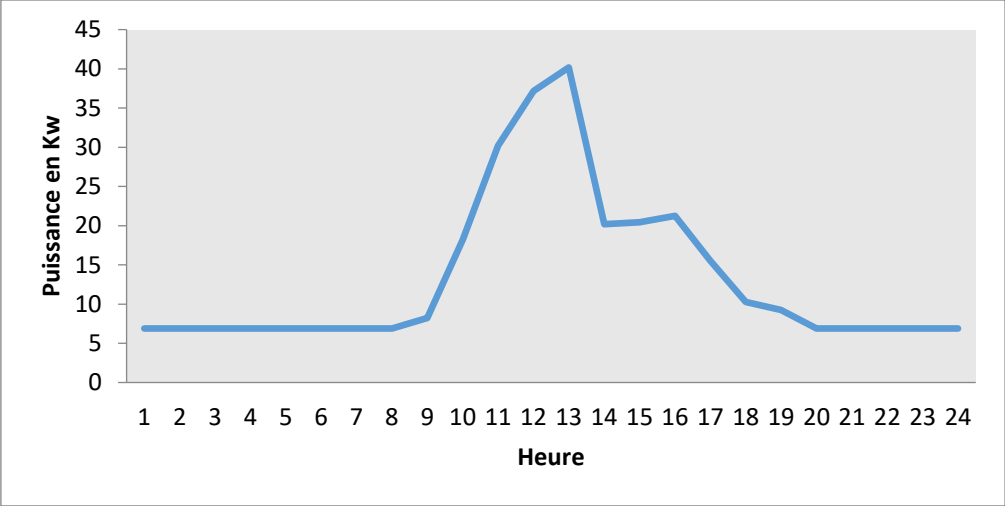


Figure 21: Profil de charge journalière de la Structure de la Nouvelle Mairie

Pour les profils de charge mensuelle, on a les mêmes variations que les profils de charge journalière. Tandis que le mois de Mars et Août, on observe des pics de puissance beaucoup plus importants. Ceux-ci pourraient être dû à l'utilisation en masse de la climatisation d'une part en période de chaleur (Mars) et d'autre part aux coupures notées pendant les périodes de forte pluie (Août). En effet, la pluie peut causer une baisse ou une hausse de tension qui impacte directement la puissance [13].

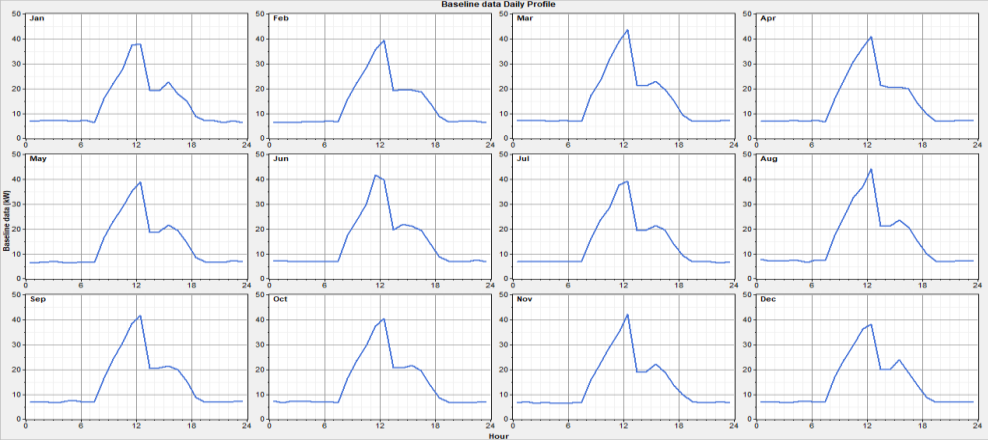


Figure 22: Profil de charge mensuel pour la Nouvelle Mairie

#### II.4.3.5. Synthèse et bilan global de la consommation électrique

La synthèse a montré que la consommation journalière obtenue à partir du bilan de puissance est supérieure à celle obtenue avec les factures d'électricité (554,467 kWh contre 492 kWh), soit un écart de 11,2 %. En effet, elle pourrait être justifiée par les puissances nominales utilisées et les appareils comptabilisés qui sont sur le lieu qui n'ont pas encore été utilisés.

Ces consommations obtenues à partir du bilan de puissance des structures sont utilisées pour aborder le bilan carbone.

### II.5. Evaluation du Bilan Carbone

Nous allons partir du bilan énergétique ci-dessus pour aborder cette partie consacrée au bilan carbone.

#### II.5.1. Définition du Bilan Carbone

Le bilan carbone est une méthode qui permet de comptabiliser les émissions de GES produites par l'activité d'une structure de manière directe (consommation d'énergie interne) ou d'une manière indirecte (déplacement des salariés et clients, fret, matière première, fin de vie des déchets ou des produits, etc.). Il est exprimé en équivalence carbone ou équivalence dioxygène et se base sur le pouvoir de réchauffement global (PRG) à 100 ans. Vue la complexité de cette étude, nous nous sommes intéressés qu'à l'activité directe particulièrement à la consommation d'énergie électrique. Le bilan de consommation électrique des quatre structures étudiées est traduit en émissions de carbones par le facteur d'émission. Ce dernier est la masse de gaz à effet de serre émise par unité d'activité. La relation (2) permet de calculer la pollution émise [14].

$$\text{Emission (Kg.éq.C)} = \text{EEC (KWh)} * \text{FEE (kg.éq.C /KWh)} \quad (2)$$

**EEC : Energie électrique consommée (kWh)**

**FEE : Facteur d'émission électrique (Kg.éq.C/KWh)**

Le facteur d'émission électrique est donné par la relation (3) [15].

$$\text{FEE} = \frac{\text{Emission annuelle}}{\text{Production annuelle d'énergie}} \quad (3)$$

Le facteur d'émission est évalué à 0,741 kg.éq.C/kWh pour le Sénégal [15]. De ce fait pour trouver la quantité émise en CO<sub>2</sub> on utilise la règle de trois ; pour 44g de CO<sub>2</sub> on a 12 g de carbone. Ces relations étudiées ont permis d'évaluer le bilan Carbone des différentes structures.

#### II.5.2. Bilan Carbone des différentes structures

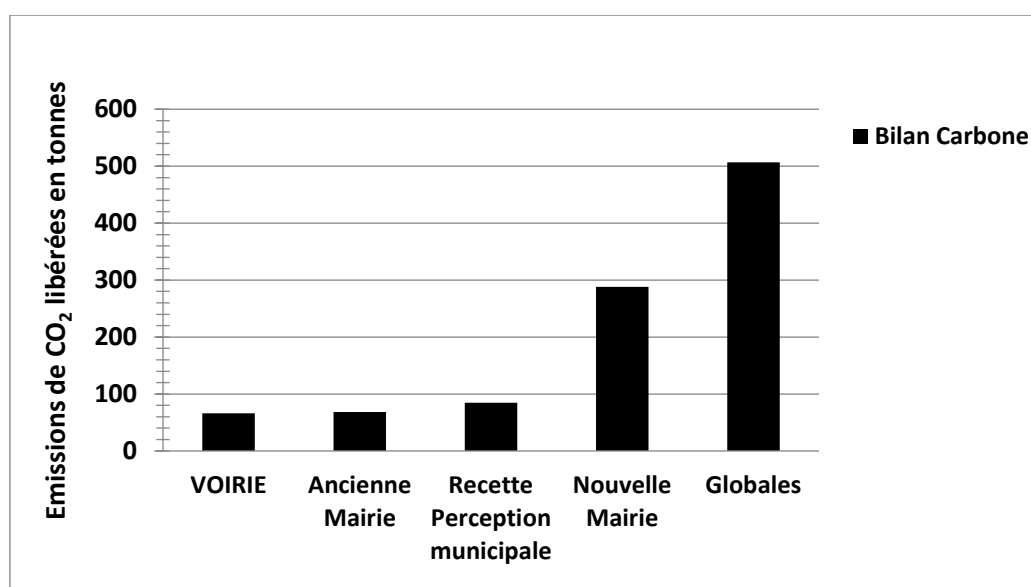
L'équation 2 est utilisée pour calculer les émissions des structures (tableau 14). Ces émissions déterminent le degré de pollution des structures. Il y'a une forte liaison entre la consommation électrique et les émissions de CO<sub>2</sub>.

**Tableau 14: Bilan carbone des structures d'études**

Sites d'études	Consommation annuelle (KWh/an)	Facteur émission électrique (Kg.éq.C/KWh )	Emissions en Tonnes équivalent CO <sub>2</sub> /année
VOIRIE	24417	0,741	66,34
Ancienne Mairie	25149	0,741	68,3
Recette et Perception Municipale	31213	0,741	85
Nouvelle Mairie	105923	0,741	288
Global	186702	0,741	507,47

### II.5.3. Synthèse et Bilan carbone global

Les émissions des différentes structures sont représentées dans la figure 23. La Mairie de Ziguinchor émet dans l'environnement 507,47 tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent par an. La structure de la Nouvelle Mairie seul représente 57 % des émissions totales. Elle est suivie par la Recette et Perception Municipale (17 %) ensuite Ancienne Mairie (13,5 %) et enfin la VOIRIE (12,5%).



**Figure 23: Synthèse du Bilan Carbone**

Ces émissions participent aux réchauffements de la planète. Donc, il est primordial de développer des mécanismes de réduction des émissions. Pour lutter contre ces émissions il faut des sources non polluantes pour satisfaire la consommation.



## Conclusion

Ce chapitre a permis de réaliser le Bilan Carbone en passant par le bilan de puissance et le bilan énergétique des structures étudiées. Les structures de la Mairie de Ziguinchor libèrent 507,47 tonnes de CO<sub>2</sub> par année liée à la consommation d'origine électrique. Pour lutter contre ces émissions de CO<sub>2</sub>, la proposition de solutions d'énergies renouvelables aux structures de la Mairie sera portée dans la suite de l'étude.

## Chapitre III : Méthodologie et dimensionnement des solutions proposées

### Introduction

Dans ce chapitre, il s'agira de présenter d'abord les outils utilisés dans la méthodologie pour mieux comprendre leurs emplois. Ensuite, les données météorologiques de la zone d'étude qui permettent d'effectuer les simulations seront abordées. Enfin, les aspects techniques et économiques seront réalisés dans le dimensionnement des solutions proposées.

### III.1. Présentation des outils de travail

HOMER et RETScreen sont utilisés pour simuler les différentes solutions présentées sur la figure 24. Les éléments de la figure 24 constituent les schémas fonctionnels des solutions proposées. Le PV intégré au réseau est l'unique solution qui n'a pas de stockage. Cependant, il est relié par un onduleur qui transforme le courant continu des panneaux en courant alternatif. Ces outils permettent de dimensionner des solutions d'énergies renouvelables simples ou hybrides.

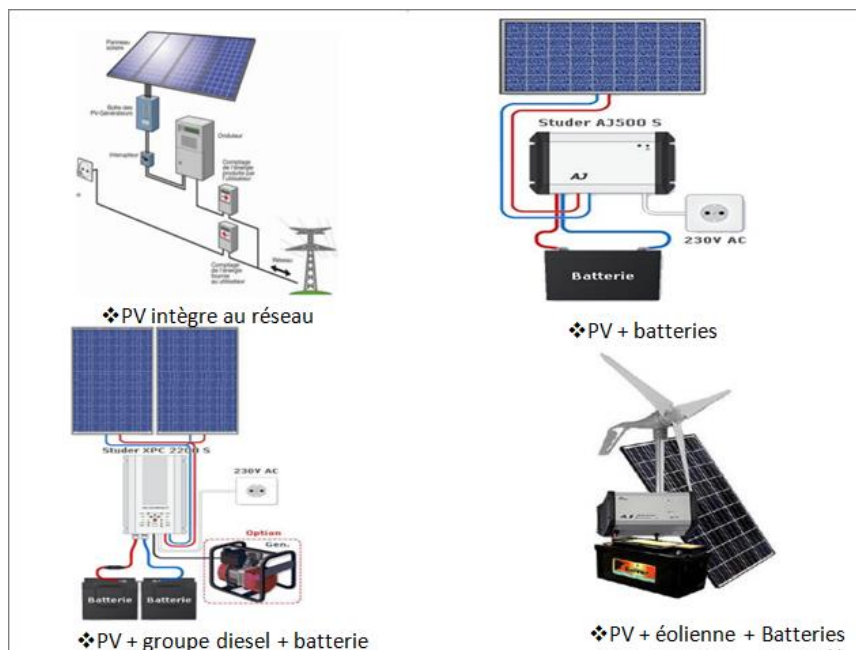


Figure 24: Les différentes technologies proposées aux différentes structures[16]

#### III.1.1. HOMER

Développé en 1992 aux Etats-Unis, par le laboratoire national des énergies renouvelables (LNER), Homer est un logiciel de dimensionnement et d'analyse des systèmes hybrides. Il permet de simuler un ou plusieurs systèmes selon des données du potentiel (Solaire, éolien,...) en fonction des besoins énergétiques du site étudié. Lors de la simulation, son système fonctionne en calculant le bilan énergétique à chaque heure pour les 8760 heures de

l'année. Il permet aussi, d'optimiser un système et de faire une étude de faisabilité technico-économique. Il permet également de choisir la technologie la plus adaptée parmi un grand nombre pour un site donné. HOMER permet de faire une étude de sensibilité aux variations de quelques paramètres pour voir si son choix de configuration technique reste la meilleure ou pas lors d'un changement de paramètres. Enfin il aide les chercheurs et les décideurs à trouver :

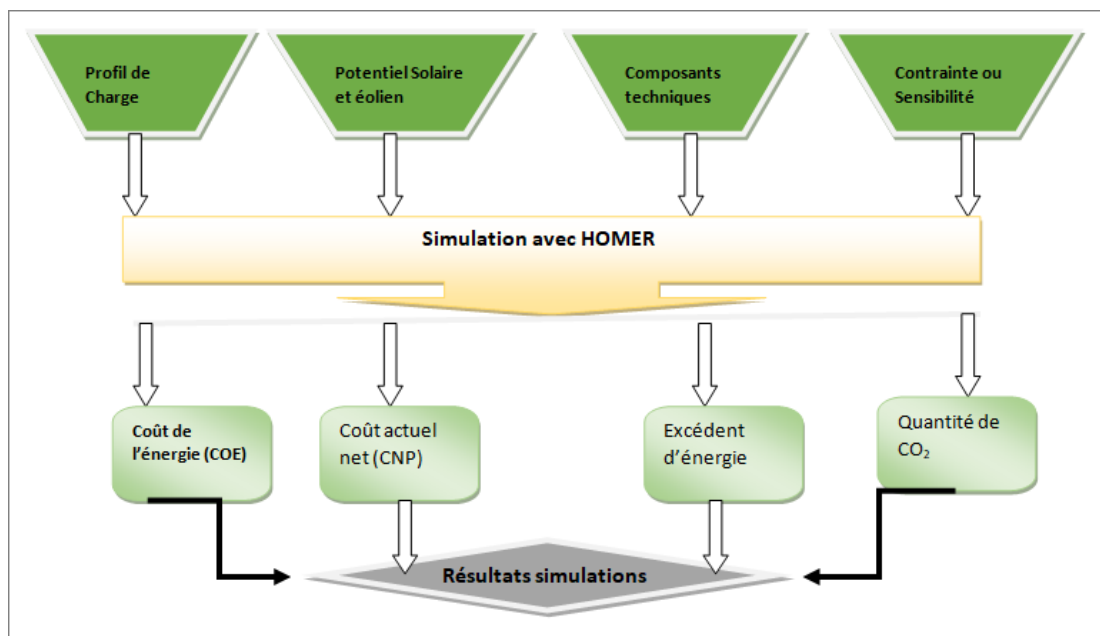
- la combinaison la moins coûteuse ;
- la technologie la plus rentable ;
- la taille des composantes des systèmes hybrides ;
- si une source d'énergie renouvelable fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement d'une structure donnée ou pas.

Il regroupe dans sa base de données plusieurs applications :

- Technologies d'énergies renouvelables raccordées au réseau ;
- Technologies d'énergies renouvelables hors réseau.

### III.1.1.1. Caractéristiques de l'outil

L'outil est caractérisé par un schéma fonctionnel (voir figure 25). Ce schéma résume les données d'entrées ainsi que les sorties après simulation.



**Figure 25: Schéma de fonctionnement de HOMER**

### III.1.1.2. Interface

L'interface de la figure 26 résume l'utilisation du logiciel. Il est facile à être utilisé dans les

projets d'aide à la décision et est constitué de trois zones réparties comme suit :

- Zone1 définissant les systèmes d'équipements ;
- Zone2 donnant la possibilité d'entrer les ressources renouvelables du site d'étude ;
- Zone3 permettant d'afficher les résultats des calculs obtenus après simulation.

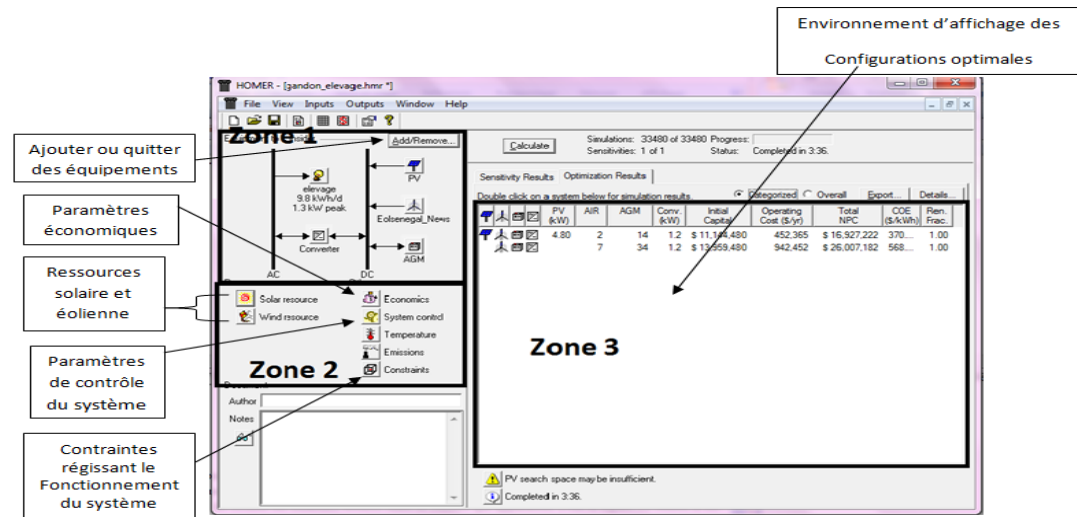


Figure 26: Interface de l'outil HOMER

### III.1.2. RETScreen

RETScreen International est un logiciel normalisé et intégré d'analyse de projets d'énergies renouvelables. RETScreen peut être utilisé dans le monde entier pour évaluer la production énergétique, le coût du cycle de vie, les économies des coûts, la viabilité financière, les risques d'utilisation des énergies propres et la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour différentes technologies d'énergies renouvelable (TER). C'est un outil qui fournit une plateforme commune permettant à la fois l'aide à la décision et le renforcement des compétences. C'est un logiciel qui est offert gratuitement par le gouvernement du Canada par l'intermédiaire du Laboratoire de recherche en diversification énergétique de CANMET (LRDEC) de Ressources naturelles Canada. Il existe trois applications de base :

- Raccordé au réseau qui s'applique aux systèmes PV sans batteries ni génératrice ;
- Hors réseau qui s'applique aux systèmes PV avec batteries ou génératrice ;
- Pompage de l'eau qui s'applique aux systèmes PV sans batteries ni génératrice.

#### III.1.2.1. Caractéristiques de l'outil

C'est un logiciel qui est développé sur un classeur Microsoft Excel composé d'une série de feuilles de calculs. Il inclut des bases de données de produits, de coûts et données climatiques

(stations météorologiques). Il a un manuel d'utilisateur en ligne.

Les solutions proposées par l'outil sont acceptées après l'analyse de certains paramètres :

-Valeur actuelle nette (VAN) qui traduit la richesse supplémentaire apportée par le projet. Ce dernier est rentable si  $VAN > 0$ .

-Taux de rendement interne (TRI), c'est un paramètre fondamental dans le choix de projet d'investissement à caractère macro-économique. Si  $TRI >$  au coût du capital, le projet est retenu.

### III.1.2.2. Interface

Les principaux éléments qui composent RETScreen sont :

-Modèle énergétique : évalue les bénéfices énergétiques des solutions proposées par rapport à des solutions conventionnelles de référence pour les mêmes besoins.

-Analyse des coûts : estime les coûts et les crédits relatifs aux solutions proposées.

-Analyse des émissions : estime le potentiel de réduction et d'émissions des GES des solutions.

-Analyse financière : évalue la rentabilité des solutions.

Les zones d'accès pour dimensionner les solutions proposées sont résumées sur la figure 27.

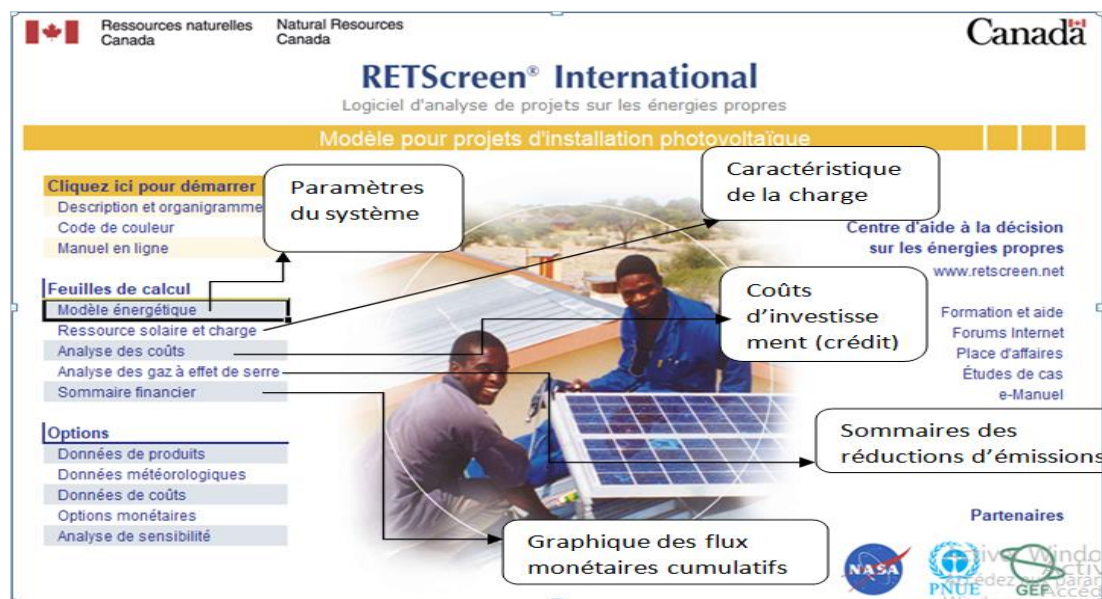


Figure 27: Interface de l'outil RETScreen

## III.2. Données météorologiques utilisées pour les outils

Les données météorologiques utilisées dans la simulation sont ceux développées au chapitre 2 en II.3. Ce sont des données satellitaires tirées du logiciel RETScreen. Les profils mensuels des données d'ensoleillement sur l'horizontal de la région de Ziguinchor sont présentés sur la figure 28. Ces profils d'ensoleillements sont presque identiques à ceux des consommations établies

dans le chapitre 2 en II.4.3. Cependant, le potentiel d'ensoleillement est très intéressant entre 8 h et 18 h pendant toute l'année correspondant aux heures de hausse de consommation. Donc cette source peut être très opportune pour les sites étudiés.

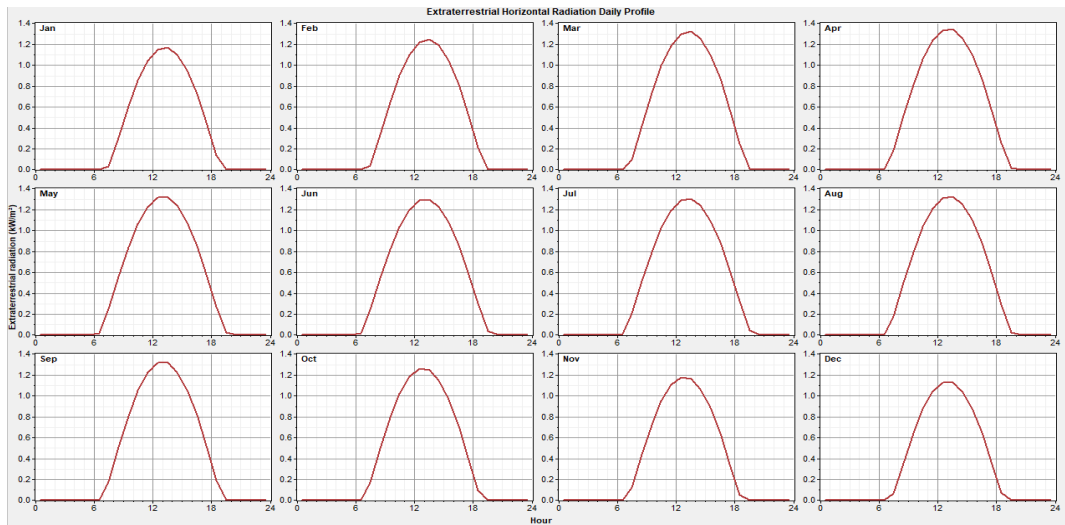


Figure 28: Profils moyens mensuels de l'ensoleillement de la région de Ziguinchor sur l'horizontal

Les vitesses moyennes mensuelles du vent sont représentées sur la figure 29. On note une vitesse moyenne mensuelle de 3 m/s environ comme celle la plus élevée dans la zone. Elle sera plus adaptée à la petite éolienne. En effet, les éoliennes se mettent donc à tourner lorsque le vent atteint une vitesse de démarrage en général 14 km/h (3 m/s) [19].

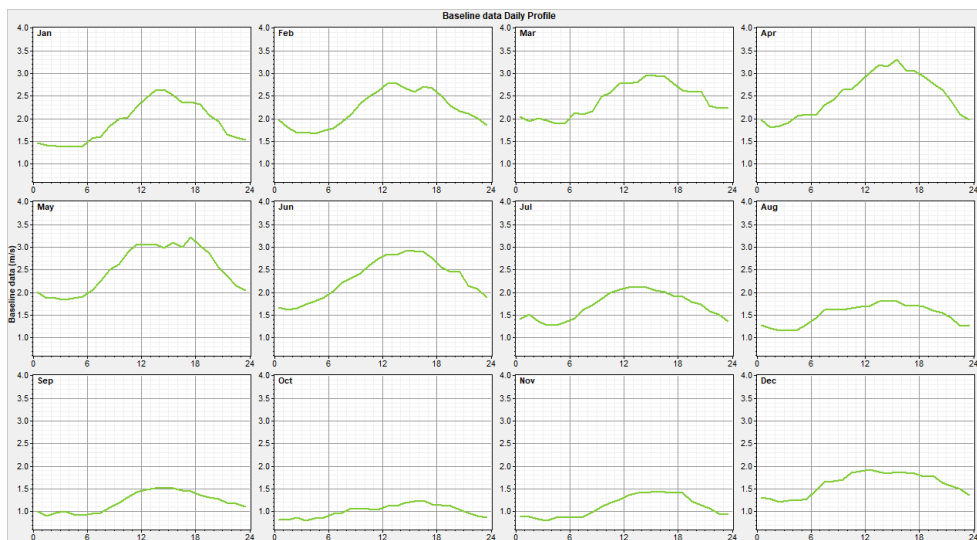


Figure 29: Profils moyennes mensuels de la vitesse du vent à 10m de la région de Ziguinchor

### III.3. Méthodes de dimensionnements des éléments

Avant de réaliser la simulation, il est impératif de donner les équipements et la demande énergétique ainsi que les coûts des éléments non modélisés qui seront inclus dans les éléments à dimensionner.

### III.3.1. Dimensionnement avec HOMER

Les architectures des systèmes dimensionnés par HOMER sont représentées sur la figure 30. Les biches AC permettent d'accrocher les sources qui génèrent du courant alternatif et celles DC du courant continu. Ainsi, ces deux sources sont reliées par un convertisseur qui génère à la fois du courant alternatif et continu pour le fonctionnement des charges branchées.

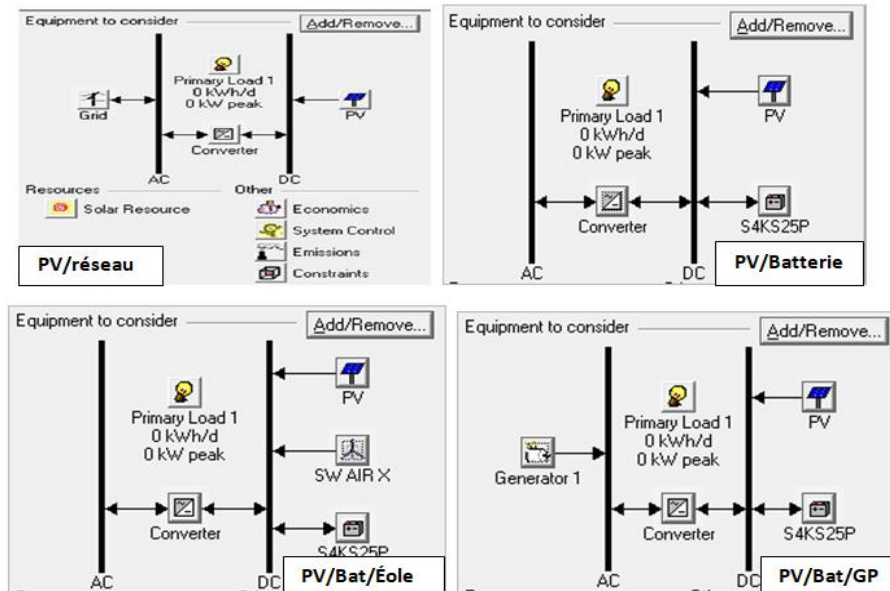


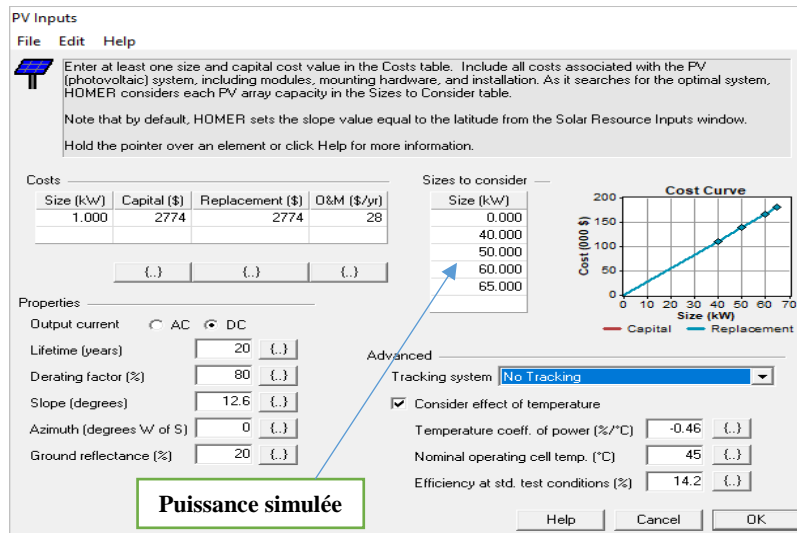
Figure 30: Architectures des solutions proposées par HOMER

#### III.3.1.1. Dimensionnement du champ PV

Les détails pour réaliser le dimensionnement sont résumés sur la figure 31. Ces valeurs sont des données d'entrées et sont variables en fonction des paramètres comme :

- la charge définissant les puissances à prendre en compte ;
- la technologie utilisée définissant les coûts et les propriétés des panneaux.

La simulation de 1 kWc en photovoltaïque produit, est évaluée pour un capital et remplacement à 2430024 Fcfa. L'opération et la maintenance sont de 12264 Fcfa/an [17].



**Figure 31: Dimensionnement du panneau PV de 1 kWc par HOMER**

### III.3.1.2. Dimensionnement du réseau

Les détails du dimensionnement sont résumés sur la figure 32. Les valeurs d'entrées sont réparties en quatre (4) parties :

Onglet « Rates » (Taux), qui regroupent trois étapes qui sont :

-Etape1 : définissant les tarifs d'électricité

-Etape2 : définissant les périodes d'utilisation du réseau

-Etape3 : permettant d'utiliser le graphique pour indiquer quand les tarifs s'appliqueront

« Emissions », elles permettent de définir les facteurs d'émission du réseau électrique pour comptabiliser les GES libérées par le réseau;

« Advanced » pour définir la puissance du réseau ainsi que les paramètres de charge et décharge entre le réseau et la batterie du système PV ;

« Forecast » permet de prévoir la vente du surplus d'électricité qui n'est pas l'objet de la simulation effectuée.

Le dimensionnement du réseau n'a pas besoin de coût de remplacement, d'opération et de maintenance.



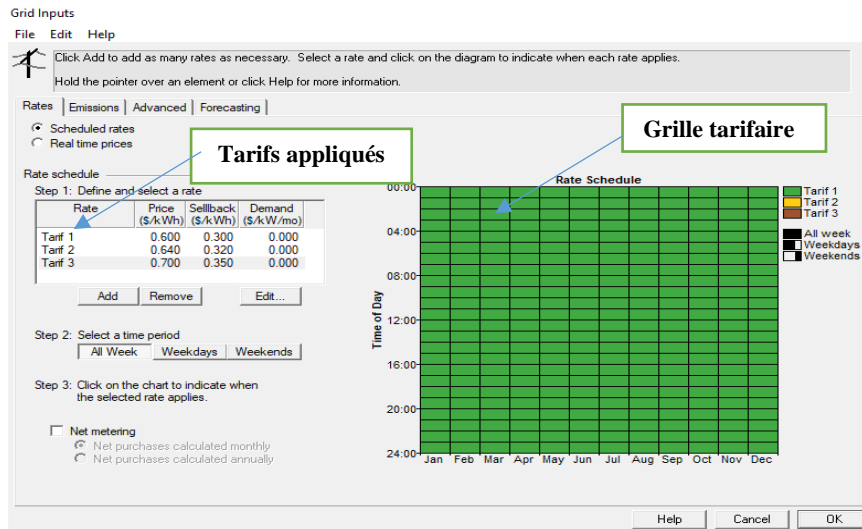


Figure 32: Dimensionnement d'un réseau fournisseur

### III.3.1.3. Dimensionnement du convertisseur

Le convertisseur va jouer le rôle de redresseur et d'onduleur dans la simulation. Son dimensionnement est effectué selon la figure 33. Les valeurs d'entrée dépendent des paramètres comme :

- la puissance pic de la charge définissant les tailles de puissance à prendre en compte dans la simulation ;
- la technologie du convertisseur utilisée définit les coûts (capital, remplacement, opération et maintenance) et les propriétés (durée de vie, rendement en mode onduleur et le rendement en mode redresseur).

Pour réaliser la simulation d'un convertisseur de 1 kW le coût du capital et le remplacement est estimé à 742848 Fcfa. Ainsi, son opération et maintenance sont de 3504 Fcfa [17].

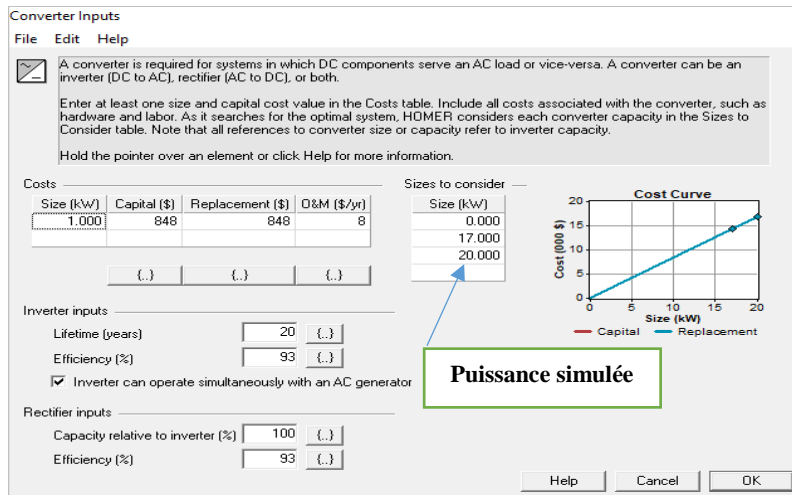


Figure 33: exemple de dimensionnement d'un convertisseur 1 kW

### III.3.1.4. Dimensionnement des éoliennes

Il y'a 25 éoliennes qui se trouvent dans la base de donnée du logiciel et dont certaines peuvent être modifiées pour donner d'autres types d'éoliennes plus faciles à obtenir sur le marché. Dans ce travail, nous avons utilisé l'éolienne de l'EolSenegal. Les détails pour réaliser le dimensionnement est résumé sur la figure 34. Les valeurs d'entrée sont très variables et dépendent des paramètres comme :

- la source de vent et la surface disponible orientent les choix sur la puissance et le nombre d'éoliennes à prendre en compte ;
- la technologie utilisée définissant les coûts (d'aérogénérateurs, durée de vie et la hauteur de l'installation) des éoliennes.

Ainsi, pour une éolienne de 0,5 kWc installée son coût de simulation du capital est évalué à 1039374 Fcfa, son remplacement à 506766 Fcfa et son opération et maintenance à 52122 Fcfa/année [18].

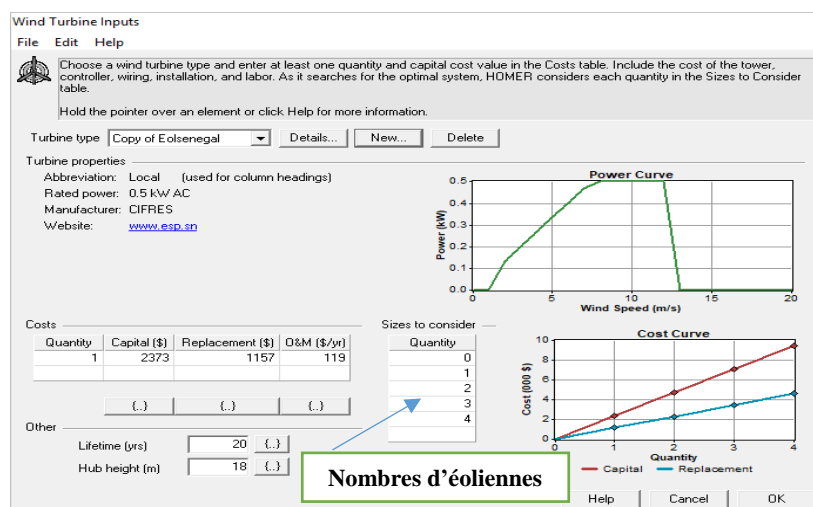


Figure 34: Dimensionnement de l'EolSenegal 0,5 Kw

### III.3.1.5. Dimensionnement de la génératrice

Les détails du dimensionnement de la génératrice sont résumés sur la figure 35. Les paramètres utilisés sont :

« Cost » qui permet de définir l'investissement de la taille des puissances à utiliser dans la simulation, de même il permet d'entrer les propriétés de la technologie utilisée ;

« Émissions » qui permet d'entrer le facteur d'émission du carburant utilisé. Ce facteur évalue les émissions libérées dans l'environnement par le groupe électrogène.

Le coût de simulation du capital ainsi que le remplacement d'une génératrice de 1 kW sont estimés à 1214136 Fcfa. Pour ce qui est de l'opération et la maintenance, il est quasi nul 20,586 Fcfa/année [17].

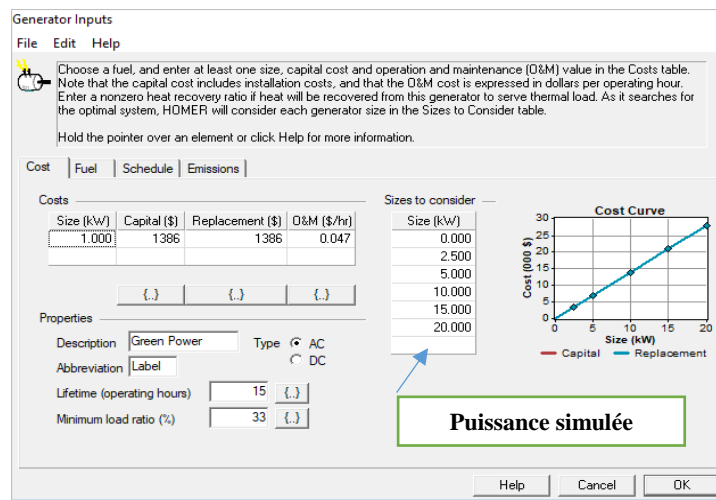
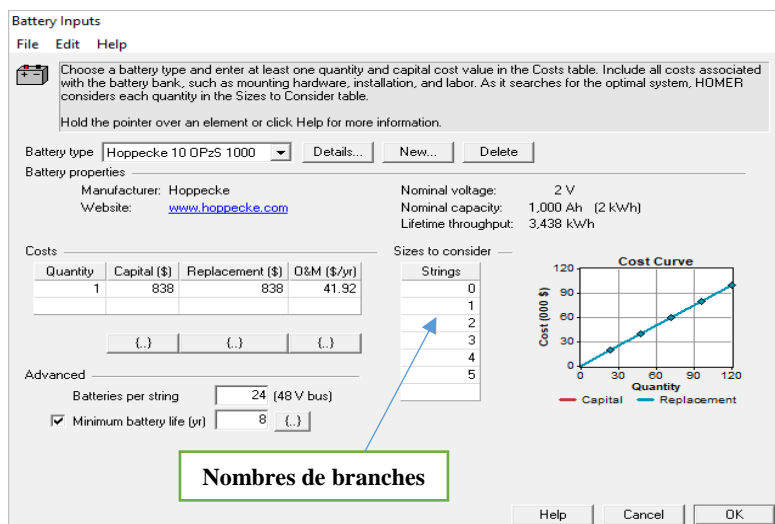


Figure 35 : Dimensionnement de la génératrice 1kW

### III.3.1.6. Dimensionnement des batteries

Dans la base de donnée de l'outil, il y'a 22 modèles de batteries proposés avec des tensions variantes (2, 4, 6, 12V) et des capacités pouvant aller de 10 à 3000Ah. Le choix de la technologie Hoppecke 10 OPzS 2V 1000Ah est basé sur sa disponibilité sur le marché, son application, sa durée de vie ainsi que son coût avantageux présenté dans la simulation. Le dimensionnement d'une batterie 2V/1000Ah est réalisé dans la figure 36. Les coûts des capitaux pour réaliser la simulation et remplacement sont de 734088 Fcfa et 18360,96 Fcfa/année pour l'opération et la maintenance [17].



**Figure 36 : Dimensionnement de la batterie**

Après avoir terminé les étapes de la méthodologie avec HOMER, nous allons poursuivre dans la suite avec l’outil RETScreen.

### III.3.2. Dimensionnement avec RETScreen

Avec cet outil seul trois simulations sont réalisées en fonction de l’espace disponible dans les différentes structures. Les solutions proposées sont les suivantes :

PV/Batteries

PV/Batteries/génératrice

PV/Réseau

Cependant, pour la quatrième solution PV/Batteries/éolienne, nous allons estimer le coût d’investissement ainsi que les paramètres tels que le retour des capitaux investis, le TRI et la VAN à partir de la solution PV/batteries. L’énergie qu’elle produira est déduite à partir du logiciel HOMER. Le dimensionnement global des différents éléments des solutions simulées est réalisé sur la figure 37.

Type d'application	Hors réseau		
<b>Batterie d'accumulateurs</b>			
Nombre de jours d'autonomie requis	j	2,0	1,0 à 15,0
Tension nominale de la batterie	V	24,0	12,0 à 120,0
Rendement de la batterie	%	85%	50% à 85%
Niveau maximal de décharge	%	70%	20% à 85%
Rendement du régulateur de charge (CC à CC)	%	95%	85% à 95%
Contrôle de la température de la batterie	-	Minimum	
Température minimale de la batterie	*C	15,0	0,0 à 15,0
Réduction moyenne de la capacité de la batterie due à la temp.	%	0%	0% à 50%
Capacité nominale suggérée de la batterie	Ah	1 697	
Capacité nominale de la batterie	Ah	1 770	
<b>Champ PV</b>			
Type de module PV	-	poly-Si	
Manufacturier de modules PV / # de modèle	-	Matrix Solar Technologies/ PW 1650-165W-24V	<a href="#">voir la base de données de produits</a>
Rendement nominal du module PV	%	11,0%	4,0% à 15,0%
Température nominale des cellules en opération	*C	45	40 à 55
Coefficient de température du module PV	% / *C	0,40%	0,10% à 0,50%
Régulateur du champ PV	-	MPPT	
Pertes diverses du champ PV	%	5,0%	0,0% à 20,0%
Puissance nominale du champ PV suggérée	kWp	1,15	
Puissance nominale du champ PV	kWp	60,23	
Surface du champ PV	m²	547,5	
<b>Génératrice</b>			
Rendement du chargeur (CA à CC)	%	95%	80% à 95%
Puissance de la génératrice suggérée	kW	6,6	
Puissance de la génératrice	kW	7,5	
Source d'énergie	-	Diesel (mazout #2) - L	
Consommation spécifique d'énergie	L/kWh	0,46	
<b>Raccordé au réseau</b>			
Type d'application	-	Raccordé au réseau	
Type de réseau électrique	-	Réseau central	
Taux d'absorption de l'énergie PV	%	100,0%	
<b>Champ PV</b>			
Type de module PV	-	poly-Si	
Manufacturier de modules PV / # de modèle	-	BP Solar/ BP MSX 60 U	<a href="#">voir la base de données de produits</a>
Rendement nominal du module PV	%	12,0%	4,0% à 15,0%
Température nominale des cellules en opération	*C	45	40 à 55
Coefficient de température du module PV	% / *C	0,40%	0,10% à 0,50%
Pertes diverses du champ PV	%	5,0%	0,0% à 20,0%
Puissance nominale du champ PV	kWp	55,05	
Surface du champ PV	m²	458,8	
<b>Conditionnement de l'énergie</b>			
Rendement moyen de l'onduleur	%	90%	80% à 95%
Puissance de l'onduleur (CC à CA) suggérée	kW (CA)	49,5	
Puissance de l'onduleur	kW (CA)	50,0	
Pertes diverses du conditionnement de l'énergie	%	5%	0% à 10%

Figure 37: résumés des étapes du dimensionnement des éléments dans RETScreen

Les éléments à dimensionner dans la figure 37 sont détaillés ci-dessous.

### III.3.2.1. Dimensionnement des batteries

Pour effectuer ce dimensionnement, le logiciel demande plusieurs paramètres variables comme :

- Le nombre de jours d'autonomie de la batterie pour sécuriser l'installation et couvrir la charge. Ce nombre varie en fonction des applications et les lieux d'utilisation ;
- La tension nominale de la batterie choisit en fonction de la charge de votre système. Elle varie dans l'intervalle 12 à 120 V dans le logiciel ;
- Le rendement de la batterie qui est le rapport entre son efficacité réelle et son efficacité théorique maximale. Il est compris entre 50 % et 85 % dans l'outil ;
- Le niveau de décharge de la batterie qui est un élément important pour déterminer la longévité des batteries et est compris entre 20 % et 85 % ;

- Le rendement du régulateur de charge permet d'optimiser la durée de vie de la batterie. Il est compris entre 85% et 95%.
- La température minimale de la batterie, c'est la température de tolérance pour la charge et la décharge normale de la batterie. Elle est comprise entre 0 et 15°C dans le logiciel.

Batterie d'accumulateurs			
Nombre de jours d'autonomie requis	j	2,0	1,0 à 15,0
Tension nominale de la batterie	V	24,0	12,0 à 120,0
Rendement de la batterie	%	85%	50% à 85%
Niveau maximal de décharge	%	70%	20% à 85%
Rendement du régulateur de charge (CC à CC)	%	95%	85% à 95%
Contrôle de la température de la batterie	-	Minimum	
Température minimale de la batterie	°C	15,0	0,0 à 15,0
Réduction moyenne de la capacité de la batterie due à la temp.	%	0%	0% à 50%
Capacité nominale suggérée de la batterie	Ah	1 697	
Capacité nominale de la batterie	Ah	1 770	

Figure 38: Exemple de dimensionnement d'une batterie

### III.3.2.2. Dimensionnement du champ PV

Dans la base de donnée de l'outil, il y'a sept 7 types de modules qu'on peut choisir parmi lesquels un est réservé pour l'utilisateur désirant crée une technologie de son choix. Dans la simulation, le Polycristallin est choisi vu les températures du milieu d'étude qui sont très élevées. La base de données de produits permet de choisir son fournisseur, le modèle désiré, le rendement nominal et la puissance nominale du module désirée (voir figure 39). Cette base de données fournie les informations qui permettent de dimensionner le nombre de panneau à installer selon l'espace disponible dans les structures d'étude.

The screenshot shows a software interface for configuring PV products. The main configuration area includes dropdown menus for 'Type de module PV' (poly-Si), 'Région' (Afrique), 'Fournisseur' (BP Solar), and 'Modèle' (BP 3150 S). Below these are input fields for 'Rendement nominal du module PV (%)' (11,6%), 'Puissance nominale du module' (150), 'Nombre de modules PV' (320), and 'Puissance nominale du champ PV' (48,00). On the right side, there are buttons for 'Aide', 'Coller les données', and 'Fermer'. At the bottom, there are two tabs: 'Information sur le fournisseur' and 'Autres informations'. The 'Autres informations' tab is active, displaying technical specifications for the BP 3150 S module: Tension (@ puissance maximale) (Volts): 34,5; Courant (@ puissance maximale) (Amps): 4,35; Tension (circuit ouvert) (Volts): 43,5; Courant (court circuit) (Amps): 4,75; Surface totale (m2): 1,26; Épaisseur du module (mm): 50; Largeur (mm): 790; Longueur (mm): 1 596; Poids (kg): 15; Certification: (empty).

Figure 39: Exemple de dimensionnement du champ PV

### III.3.2.3. Dimensionnement de la génératrice

Le dimensionnement de la génératrice dépend de trois éléments paramètres essentiels :

- Puissance de la génératrice qui est suggérée en fonction de la charge énergétique journalière de l'étude ;
- Source d'énergie qui détermine la nature de consommation en combustible de la génératrice. Il y'a huit (8) combustibles disponibles dans la base de données du logiciel. Pour faire la simulation, on a choisi le même combustible Diesel utilisé avec HOMER ;
- Consommation spécifique d'énergie, désignant le nombre de litres consommés par la génératrice pour 1 kWh fourni. La valeur de la littérature est de 0,1 l/kWh. C'est celle-ci qui est utilisée dans la simulation.

Générateur			
Rendement du chargeur (CA à CC)	%	95%	80% à 95%
Puissance de la génératrice suggérée	kW	6,6	
Puissance de la génératrice	kW	7,5	
Source d'énergie	-	Diesel (mazout #2) - L	
Consommation spécifique d'énergie	L/kWh	0,46	

**Figure 40 : Exemple de dimensionnement d'une génératrice**

### III.3.2.4. Dimensionnement du réseau

Pour le dimensionnement, le logiciel demande de choisir un réseau central ou isolé avec un taux de pénétration du solaire qui est choisi à 100%.

Type d'application	-	Raccordé au réseau
Type de réseau électrique	-	Réseau central
Taux d'absorption de l'énergie PV	%	100,0%

**Figure 41: Exemple de dimensionnement du réseau**

### III.3.2.5. Coûts des éléments pour le dimensionnement

Les coûts des éléments sont répartis dans les équipements énergétiques et aux infrastructures connexes sur la figure 42. Les mêmes coûts de simulations avec HOMER sont utilisés. Pour 1 kWc le logiciel a évalué le coût du champ PV, les batteries, la génératrice ainsi que les autres équipements utilisés.

Équipements énergétiques						
Modules PV	kWp	60,23	CAD 2 774	CAD	167 078	\$5,500 - \$8,000
Transport	projet	1	CAD 1 200	CAD	1 200	
Autres - Equipements énergétiques	Coût	1	CAD 1 000	CAD	1 000	
Crédits - Equipements énergétiques	Crédit	1	CAD 500	CAD	(500)	
Sous-total :				CAD	168 778	44,8%
Infrastructures connexes						
Structure portante	m <sup>2</sup>	547,5	CAD -	CAD	-	\$0 - \$200
Onduleur	kW CA	0,5	CAD 848	CAD	424	
Génératrice	kW	7,5	CAD 1 383	CAD	10 373	
Batteries (1770 Ah @ 24 V)	kWh	42	CAD 1 484	CAD	63 040	
Autres équipements électriques	kWp	60,23	CAD 310	CAD	18 671	\$700 - \$1,500
Installation du système	kWp	60,23	CAD 880	CAD	53 002	\$900 - \$2,500
Transport	projet	1	CAD 500	CAD	500	
Autres - Infrastructures connexes	Coût	1	CAD 445	CAD	445	
Crédits - Infrastructures connexes	Coût	1	CAD 330	CAD	330	
Sous-total :				CAD	146 786	39,0%

**Figure 42: Coûts des éléments dimensionnés**

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé les outils HOMER et RETScreen pour dimensionner les solutions d'énergies renouvelables. HOMER a été utilisé pour simuler les solutions qui couvrent toutes la consommation. Il permet aussi d'optimiser les solutions à simuler. Alors que le logiciel RETScreen est utilisé pour exploiter les espaces disponibles dans les Structures d'étude et savoir les temps de retour des capitaux investis.



## **Chapitre IV : Analyse technico-économique et environnemental des solutions proposées**

### **Introduction**

Cette étude technico-économique et environnementale consiste à analyser et à comparer un ensemble de systèmes énergétiques pour répondre aux besoins de la consommation de manière totale ou partielle. D'abord, les résultats de l'analyse sont présentés pour HOMER en solutions globales (non optimisées) et optimales (optimisées) et ceux de RETScreen sont classés en fonction de l'espace disponible. Ensuite, une étude comparative des coûts d'investissements des solutions proposées est réalisée. Enfin, l'impact des émissions évitées sur le bilan carbone par les solutions proposées est évalué.

### **IV.1. Présentations des solutions**

#### **IV.1.1. Solutions Obtenues par HOMER**

Avec HOMER deux types de solutions ont été retenues. Les solutions globales non optimisées qui sont obtenues sans ajustement de paramètres et les solutions optimales (optimisées). Ces solutions optimisées ont été obtenues par ajustement des paramètres tels que la capacité maximale annuelle en pénurie, la réserve de fonctionnement pour la charge de pointe et la réserve d'exploitation pour la charge horaire. Cet ajustement des paramètres a pour but de minimiser le prix de revient de l'énergie et le coût d'investissement.

##### **IV.1.1.1. Solutions Globales**

Ces résultats sont présentés dans le tableau 15 pour chaque structure. Les paramètres étudiés pour chaque type de système sont : coût d'investissement total, prix de revient de l'énergie, émissions de CO<sub>2</sub> évitées et la fraction d'énergie renouvelable. Les résultats de simulation montrent que la solution PV/intégré au réseau est beaucoup plus avantageuse du point de vue économique pour toutes les structures malgré la différence de puissance. En effet, ce système n'a pas besoin de stockage qui augmente les coûts d'investissements. Elle est suivie par la solution PV/batteries pour la majorité des cas. Contrairement aux études menées par [18] dans les zones du Sakhor, Gandon, Potou où le système PV/éolienne/batteries est jugé plus intéressant sur le plan économique et environnemental par rapport au système PV/batteries. Cela pourrait être dû au potentiel intéressant en solaire et éolienne du milieu d'étude. Or dans notre cas d'étude, le potentiel éolien fourni par les données satellitaires est trop faible (1,86 m/s moyenne annuelle). En effet, le faible potentiel éolien fourni par les données satellitaires, a

impacté négativement le prix de revient de l'énergie du système PV/éolienne/batteries (voir tableau 15). Dans tous les systèmes proposés, son prix de revient est beaucoup plus élevé. Par contre, le prix de revient de l'énergie est un facteur clé pour déterminer la meilleure solution sans tenir compte du volet environnement. Au regard de ce paramètre le système PV/batteries/groupe est classé comme la meilleure solution après PV/intégré au réseau dans toutes les structures sauf la Nouvelle Mairie. Dans cette dernière, PV/Batteries est la meilleure solution après PV/intégré au réseau.

Tableau 15: Solutions globales proposées par HOMER

Lieu : VOIRIE P=10,541kw E=64,331KWh Type de système							Lieu : Ancienne Mairie P=19,336kw E=72,964KWh Type de système						
Résumé du système	Investissement TOTAL système (F.cfa)	Coût de revient de l'énergie (F.cfa)	Emissions évitées en Tonne E.CO2/année	Fraction renouvelable (%)	Excès électricité KWh/an	Résumé du système	Investissement TOTAL système (F.cfa)	Coût de revient de l'énergie (F.cfa)	Emissions évitées en Tonne E.CO2/année	Fraction renouvelable (%)	Excès électricité KWh/an		
PV+ Réseau Réseau électrique+ 20 KwC PV+ 18 KW Onduleur+18 KW redresseur	47368408	125,706	52,5	80	17,58	PV+ Réseau Réseau électrique+ 25 KwC PV+ 19 KW Onduleur+19 KW redresseur	61177212	181,332	64,5	80	13,9		
PV + Batteries 23,6 KwC PV+48 Batteries+ 10 KW Onduleur+10 KW Redresseur	88377450	297,4	89,3	100	6517	PV + Batteries 25 KwC PV+48 Batteries+ 17 KW Onduleur+17 KW Redresseur	112735068	336,822	91,6	100	4161		
PV + Batteries + Eoliennes 20,5 KwC PV+ 4 turbine + 48 Batteries + 18 KW Onduleur + 18 KW Redresseur	113800722	383,25	75	100	6128	PV + Batteries + Eoliennes 25 KwC PV+ 4 turbine + 48 Batteries + 19 KW Onduleur+19 KW Redresseur	131588340	390,258	100	100	8421		
PV + Batteries + Groupe 15,6 KwC PV+ 5 KW groupe+ 24 batteries+ 20KwC redresseur+ 20KW onduleur	85233048	286,89	57,2	80	222	PV + Batteries + Groupe 20 KwC PV+ 2,5 KW groupe+ 24 batteries+ 18KwC redresseur+ 18KW onduleur	81724500	244,542	65,8	80	671		
Lieu : RPM P=20,641kw E=96,713KWh Type de système							Lieu : Nouvelle Mairie P=67,706kw E=320,459KWh Type de système						
Résumé du système	Investissement TOTAL système (F.cfa)	Coût de revient de l'énergie (F.cfa)	Emissions évitées en Tonne E.CO2/année	Fraction renouvelable (%)	Excès électricité KWh/an	Résumé du système	Investissement TOTAL système (F.cfa)	Coût de revient de l'énergie (F.cfa)	Emissions évitées en Tonnes E.CO2/année	Fraction renouvelable (%)	Excès électricités KWh/an		
PV+ Réseau Réseau électrique+ 36 KwC PV+ 26 KW Onduleur+26 KW redresseur	65951850	147,606	73,1	80	36,1	PV+ Réseau Réseau électrique+ 75 KwC PV+ 100KW Onduleur+100 KW redresseur	217880387	180	200	80	0,00098		
PV + Batteries 36 KwC PV+48 Batteries+ 26 KW Onduleur+26 KW Redresseur	136894018	300,906	120,8	100	5798	PV + Batteries 114 KwC PV+96 Batteries+101KW Onduleur+101 KW Redresseur	340942704	240,024	417,6	100	28404		
PV + Batteries + Eoliennes 28,5 KwC PV+ 4 turbines + 48 Batteries + 26 KW Onduleur + 26 KW Redresseur	128104926	293,022	115,15	100	4834	PV + Batteries + Eoliennes 107 KwC PV+ 4 turbines + 96 Batteries + 91 KW Onduleur + 91 KW Redresseur	344993700	245,09	402,7	100	23731		
PV + Batteries + Groupe 24 KwC PV+ 12 KW groupe+ 24 batteries+ 26KwC redresseur+ 26 KW onduleur	109044918	244,404	80,9	80	857	PV + Batteries + Groupe 65 KwC PV+ 50 KW groupe+ 96 batteries+ 101KW redresseur+ 101 KW onduleur	391878208	265,2	238,1	80	0,000148		

Ces solutions globales proposées ont des coûts d'investissement et des prix de revient de l'énergie très élevés. Pour améliorer ces coûts, des valeurs variant de 0 à 5 % sont attribuées à la capacité maximale annuelle en pénurie et la réserve de fonctionnement de la charge de pointe et la réserve d'exploitation pour la charge horaire de 5 à 10 %. C'est ainsi qu'on obtient des solutions avec des coûts d'investissements et prix de revient de l'énergie plus avantageux.

#### IV.1.1.2. Solutions optimales

Les coûts d'investissements et le prix de revient de l'énergie ont diminué selon la charge de la structure et du système proposé. Dans ces solutions le PV/réseau électrique a le prix de revient de l'énergie le plus bas dans toutes les structures (voir tableau 16). Il est suivi de la solution PV/batteries/Groupe dans les structures comme VOIRIE, Ancienne Mairie et RPM dû au fait que la puissance du groupe utilisée n'est pas assez élevée. Mais pour la Nouvelle Mairie où la charge pic est très importante, il faut au moins un groupe assez puissant pour venir combler les déficits. Ceci a impacté négativement le coût de revient de l'énergie. Un excédant d'électricité important est produit par les systèmes PV/batteries et PV/batteries/éolienne dans toutes les structures. Et ces excédants proviennent de la production des champs pendant les jours de repos des employés. En effet, pendant ces jours le système produit de l'énergie en fonction de la charge dimensionnée qui sera non consommée par les appareils électriques. Pour les systèmes PV/intégré au réseau, le réseau est sollicité à hauteur de 20% de la charge. Pour le système PV/batteries/Groupe, 20% est sollicitée par le groupe pour compléter la charge en cas de déficit. Pour le système PV/batterie/éolien, l'outil sollicite la technologie dont la source est plus disponible tout en tenant compte de la classe de puissance (voir tableau 16). Ceci impacte la production annuelle des différents systèmes proposés montré par la figure 43. Dans ces productions électriques, l'énergie fournie par l'éolienne est beaucoup plus visible au niveau des structures où la consommation n'est pas assez importante comme VOIRIE, Ancienne Mairie et RPM. Elle est observée pendant les mois de janvier à août et décembre où le potentiel éolien est intéressant. Pour la Nouvelle Mairie, où la consommation est assez importante, le système éolien augmente les coûts d'investissements du système. En effet, il faut plusieurs éoliennes pour couvrir une part importante de la consommation. Pour le système PV/batteries/Groupe où ce dernier est sollicité par complémentarité pendant les périodes où la source solaire n'est pas assez importante. En général, dans toutes les structures pendant les mois d'Avril, Mai et Juin le groupe électrogène est très peu sollicité pour combler le déficit énergétique (voir figure 43). Parce que pendant ces mois la production solaire est très intéressante.

**Tableau 16: Solutions optimales proposées par HOMER**

Lieu : VOIRIE P=10,541kw E=64,331KWh Type de système							Lieu : Ancienne Mairie P=19,34kw E=72,96KWh Type de système						
Résumé du système	Investissement TOTAL système (Fct)	Coût de revient de l'énergie (Fct)	Emissions évitées en Tonne E.CO2/année	Fraction renouvelable (%)	Excès électricité KWh/an	Système proposé	Investissement TOTAL système (Fct)	Coût de revient de l'énergie (Fct)	Emissions évitées en Tonne E.CO2/année	Fraction renouvelable (%)	Excès électricité KWh/an		
PV+ Réseau	45840664	120,45	50,3	80	7,58	PV+ Réseau	60782136	180,018	60,6	80	13,9		
PV + Batteries	87554010	295	85,4	100	5935	PV + Batteries	112318968	335,508	91,6	100	6421		
PV + Batteries + Eoliennes	113384622	381,498	80,8	100	5118	PV + Batteries + éolienne	131172240	388,944	85,31	100	4161		
PV + Batteries + Groupe	83984310	282,51	57,15	80	222	PV + Batteries + Groupe	80723400	242,65	65,5	80	471		

Lieu : RPM P=20,641kw E=96,713KWh Type de système							Lieu : Nouvelle Mairie P=67,706kw E=320,459KWh Type de système						
Résumé du système	Investissement TOTAL système (Fct)	Coût de revient de l'énergie (Fct)	Emissions évitées en Tonne E.CO2/année	Fraction renouvelable (%)	Excès électricité KWh/an	Résumé du système	Investissement TOTAL système (Fct)	Coût de revient de l'énergie (Fct)	Emissions évitées en Tonne E.CO2/année	Fraction renouvelable (%)	Excès électricité KWh/an		
PV+ Réseau	65581302	146,73	73	80	98	PV+ Réseau	217580387	176,952	200	80	0,00098		
PV + Batteries	136427110	299,592	120,8	100	5798	PV + Batteries	340734654	239,586	417,6	100	28404		
PV + Batteries + Eoliennes	127688826	292,146	115,15	100	4834	PV + Batteries + Eoliennes	344990700	243,09	402,74	100	23731		
PV + Batteries + Groupe	108628380	243,09	80,9	80	857	PV + Batteries + Groupe	390878208	264,114	238,14	80	0,000148		

Les productions annuelles des systèmes proposés sont représentées dans la figure 43. Elles permettent de couvrir toutes les charges qui sont consommées dans ces structures.

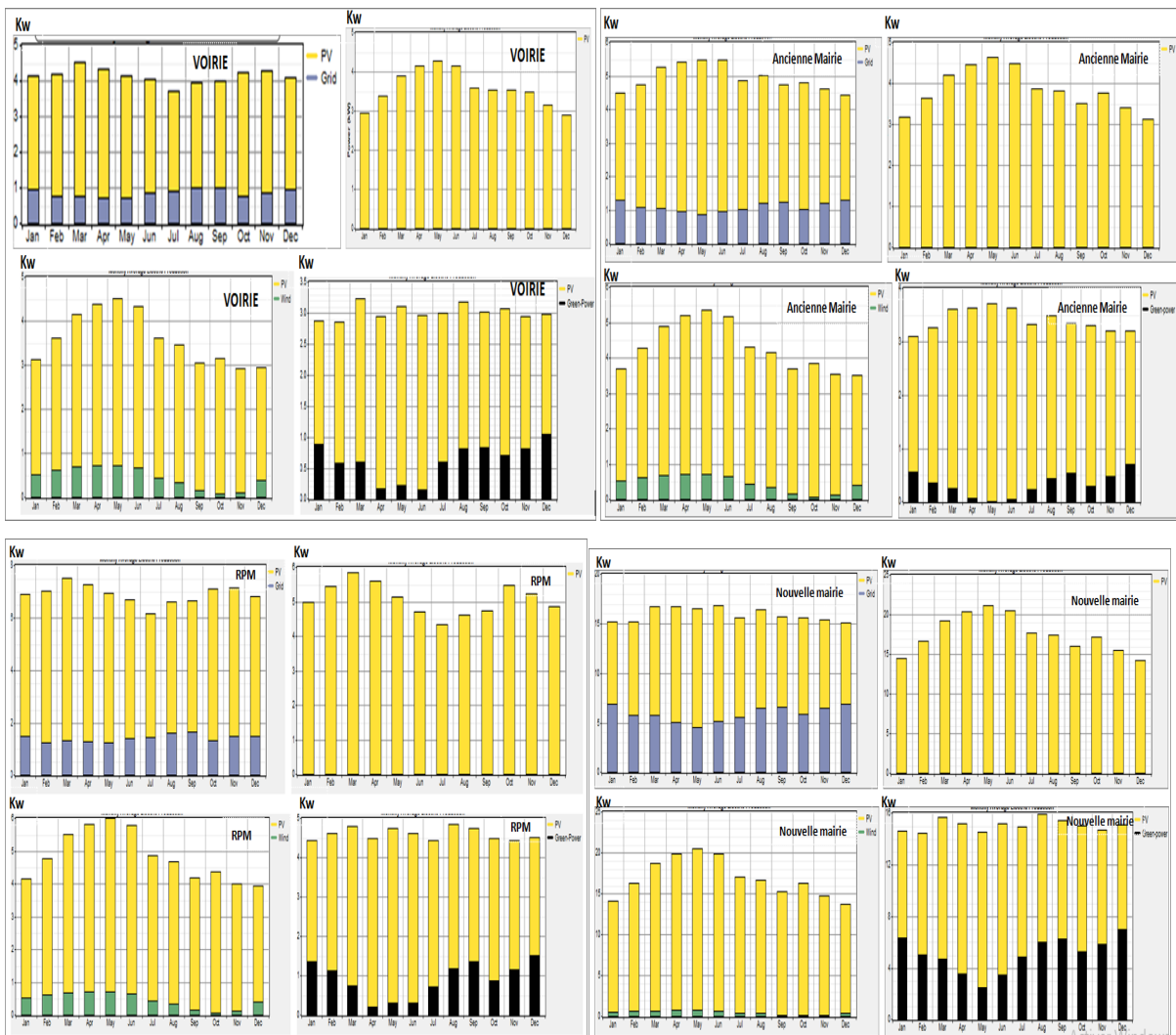


Figure 43: Répartition de la production des quatre solutions proposées pour chaque structure

Ces solutions sont simulées par HOMER de façon à couvrir toute la consommation au niveau de ces structures. Par contre, dans la suite, les solutions proposées sont simulées par RETScreen en fonction de l'espace disponible.

#### IV.1.2. Solutions obtenues par RETScreen

Cet outil a simulé les solutions proposées en fonction de l'espace disponible dans les structures. Plus la surface disponible est grande, plus la puissance du champ photovoltaïque est importante.

##### IV.1.2.1. Solutions selon l'espace disponible pour les Structures

Les résultats de simulation sont présentés dans le tableau 17. Les graphes du flux monétaire des différentes solutions sont présentés dans les annexes 1 à 8. Ces graphes nous donnent l'année de retour des capitaux investis correspondant à l'année à partir de laquelle l'investissement est

amorti. Ils montrent également les bénéfices en fonction du temps durant toute la durée de vie du projet. Ainsi parmi les solutions proposées, les années de retour sur investissement sont comprises entre 5,1 et 13,5 ans. Les rendements internes (TRI) varient entre 10,6 et 21,9%. Donc en se basant sur ces paramètres, toutes les solutions proposées sont rentables. En effet, avant la fin de vie de ces projets proposés les capitaux investis seront récupérés. Ces taux de rendement obtenus sans scénario de subvention sont en cohérence avec les études menées par [19]. Dans ce travail il a montré que la subvention augmente le taux de rendement interne. Ainsi, pour les solutions proposées, le taux de rendement interne qui représente le rendement réel pour la durée de vie des projets est plus élevé pour le système PV/intégré au réseau suivi par le PV/Batteries et enfin le PV/Batteries/Groupe. Ce taux varie en sens inverse avec les coûts d'investissement. En effet, lorsque ceux-ci augmentent le taux de rendement diminue. La solution PV/intégré au réseau est la meilleure solution selon les coûts d'investissements avec un déficit énergétique nul dans toutes les structures avec un taux de rendement meilleur et un coût de revient d'électricité plus faible. Pour ces solutions on peut s'attendre à ce que le réseau soit beaucoup plus sollicité par rapport aux solutions obtenues avec HOMER. La richesse supplémentaire (VAN) apportée est beaucoup plus importante pour la solution PV/batteries (voir tableau 17). Ceci s'explique par les économies qu'elle apportera aux structures. La solution PV/Batteries/éolienne est aussi intéressante car elle permet de couvrir toute la charge au niveau des structures comme VOIRIE, Ancienne Mairie et la RPM. Pour les autres solutions (PV/Batteries, PV/Batteries/Groupe et PV/Batteries/réseau), la charge des structures n'est pas entièrement couverte. Par conséquent, les structures vont investir pour compenser ce déficit (paiement facture ou achat de gasoil, etc.). Pour les structures VOIRIE, Ancienne Mairie, RPM le groupe est sollicité à 10% de la charge (voir tableau 17). Les espaces disponibles ont permis de couvrir presque toute la charge (voir tableau 17). Contrairement aux autres structures, pour la nouvelle Mairie la sollicitation du groupe est à 20% de la charge. Cela a impacté sur les coûts d'investissement de la solution PV/batteries/Groupe de la Nouvelle Mairie.

Tableau 17: Solutions proposées par RETScreen en fonction de l'espace disponible

Lieu : VOIRIE P=10,541kw E=64,331KWh S= 150m <sup>2</sup> Type de système									Lieu : Ancienne Mairie P=19,336kw E=72,964Kwh S=190m <sup>2</sup> Type de système								
Système proposé	Investissement TOTAL système (Fcf)	Coût de revient de l'énergie (Fcf)	Emissions évitées en Tonne E.CO2/année	Année retour capitaux investis	TRI %	VAN (Fcf)	déficit électricité KWh/an		Système proposé	Investissement TOTAL système (Fcf)	Coût de revient de l'énergie (Fcf)	Emissions évitées en Tonne E.CO2/année	Année retour capitaux investis	TRI %	VAN (Fcf)	déficit électricité KWh/an	
PV+ Réseau	16 kWc PV + Onduleur + Redresseur 17kW 45301902	100,74	45,41	5,1	20,9	19245282	0		PV+ Réseau	20kWc PV + Onduleur + Redresseur 18 kW 48997746	126	57,7	5,1	21,9	28041592	0	
PV + Batteries	18 kWc PV + 48 Batteries 73588015	169,16	78,6	6	11,9	63541755	0		PV + Batteries	23 kWc PV + 24 Batteries 84534876	140,16	74,4	11,2	12,1	40912266	0	
PV/Batteries/éoliennes	16 kWc PV + 48 Batteries + 4 Turbines 96441287	222	64,41	7,5	10,6	83275090	0		PV/Batteries/éoliennes	21 kWc PV + 24 Batteries + 4 Turbines 103388148	172	85,2	12,7	10,8	45036666	0	
PV + Batteries + Groupe	18 kWc PV + 48 Batteries 3 Kw Groupe 82683106	120	6,47	10,5	18,5	76194480	0		PV + Batteries + Groupe	23 kWc PV + 20 Batteries + 2,5 Kw Groupe 86083206	148,92	54	12	11,6	39113838	0	

Lieu : RPM P=20,641kw E=96,713KWh S= 250m <sup>2</sup> Type de système									Lieu : Nouvelle Mairie P=67,706kw E=320,459Kwh S=540m <sup>2</sup> Type de système								
Système proposé	Investissement TOTAL système (Fcf)	Coût de revient de l'énergie (Fcf)	Emissions évitées en Tonne E.CO2/année	Année retour capitaux investis	TRI %	VAN (Fcf)	déficit électricité KWh/an		Système proposé	Investissement TOTAL système (Fcf)	Coût de revient de l'énergie (Fcf)	Emissions évitées en Tonne E.CO2/année	Année retour capitaux investis	TRI %	VAN (Fcf)	déficit électricité KWh/an	
PV+ Réseau	25 kWc PV + Onduleur + Redresseur 25 KW 65007960	135	41,7	6	19	54894540	0		PV+ Réseau	65 kWc PV + Onduleur + Redresseur 70 KW 175300740	130,66	133	6,3	18,5	145271898	0	
PV + Batteries	30 kWc PV + 48 Batteries 88305618	185,22	97,06	6,8	17,3	83483676	0		PV + Batteries	65 kWc PV + 48 Batteries 221605662	140,16	216,77	11,5	11,9	102915546	25576	
PV + Batteries + éolienne	28 kWc PV + 48 Batteries + 4 Turbines 107158890	210	107,78	8	14,3	98130746	0		PV + Batteries + éoliennes	63 kWc PV + 48 Batteries + 4 Turbines 240458934	152	210	12	11	94846415	28541	
PV + Batteries + Groupe	30 kWc + 24 Batteries + 12 Kw Groupe 95289528	157,68	92,06	7,5	16,3	68669202	0		PV + Batteries + Groupe	65 kWc PV + 48 Batteries + 50 KW Groupe 253895898	166,44	138,9	13,5	10,8	101510880	0	

Après avoir présenté les solutions autonomes et celles en fonction de l'espace disponible, l'étude comparative des coûts est présentée dans la suite.

#### IV.2. Analyse comparative des Coûts investissements de deux solutions proposées

Les coûts d'investissements varient d'une solution à une autre au sein d'une même structure (voir figure 44). Pour tous les systèmes proposés de façon autonome les coûts d'investissement atteignent souvent plus de 100 millions de Fcf dans les trois premières structures (figure 44a). Seule la solution PV/Batteries/éoliennes coûte environ 110 millions Fcf. Pour la nouvelle Mairie, tous les coûts ont doublés par rapport aux autres structures pour toutes les solutions. Du point de vue économique, les solutions selon l'espace disponible sont très avantageuses dans toutes les structures malgré les différences de puissance. Néanmoins, il faut juste noter que les solutions autonomes apporteront beaucoup plus d'économie à long terme car il n'y a pas de déficit énergétique. L'excédent énergétique est un facteur garantissant la sécurité de la charge de pointe. Pour les solutions à taux de couverture égale à 100% (voir figure 44a), le PV/réseau électrique est la meilleure solution en termes de coût d'investissement pour l'ensemble des structures Il est suivi par le PV/Batteries/groupe puis le PV/batteries et enfin le

PV/batteries/ éoliennes dans les trois premières structures. Ensuite, pour les solutions à taux de couverture variable (voir figure 44b), les meilleures solutions sont classées par ordre croissant dans toutes les structures sauf la nouvelle mairie.

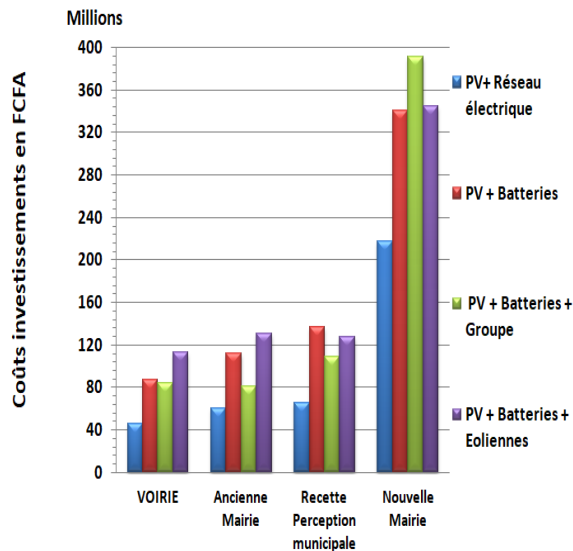


Figure 44a : Taux de couvertures à 100%

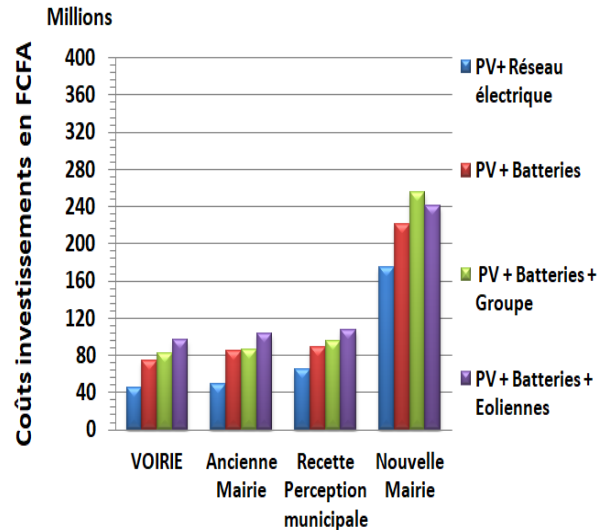


Figure 44b : Taux de couverture variable

#### Figure 44: Cout investissement des solutions autonomes en fonction du taux de couverture

Cette analyse réalisée a montré que pour les structures comme VOIRIE, Ancienne Mairie et Recette Perception Municipale, il est judicieux d'adopter les solutions autonomes. La différence des coûts n'est pas assez importante et ces solutions apportent beaucoup plus de sécurité pour la couverture de la charge. Par contre, pour la Nouvelle Mairie, les solutions en fonction de l'espace sont plus favorables en termes de coût d'investissement. En effet, la différence de coût est très importante et le déficit énergétique est souvent comblé par une autre source énergétique à des coûts moindre.

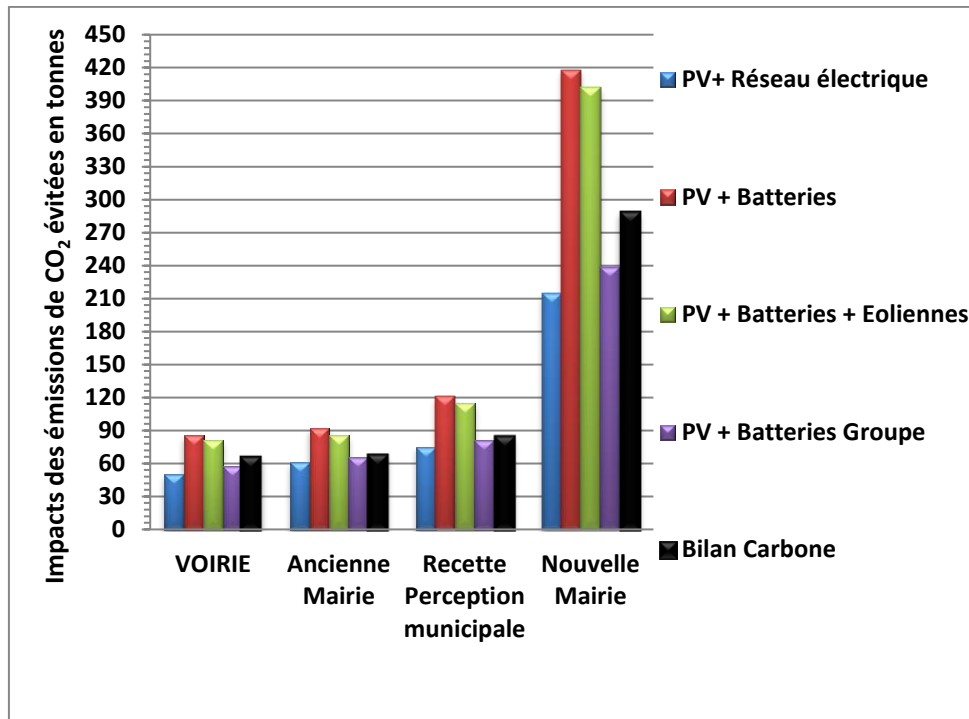
Du point de vue environnemental, l'étude de l'impact des émissions évitées par les solutions proposées sur le bilan carbone est réalisée. Ceci permet de voir comment ces solutions peuvent participer à garantir une planète plus verte et durable.

### IV.3. Analyse de l'impact des émissions évitées sur le bilan carbone

Les émissions évitées augmentent en fonction de la puissance des champs renouvelables installés (voir figure 45). Dans ces solutions où le taux de couverture de la charge est à 100%, les solutions PV/Batteries et PV/Batteries/éoliennes permettent de réduire toutes les émissions dans les différentes structures. Les solutions PV/réseau électrique et PV/Batteries/Groupe quant à elles ne permettent pas d'éviter toutes les émissions. En effet, la partie de la charge



couverte par le réseau électrique où le groupe va contribuer aux émissions de GES. Ainsi, les solutions purement renouvelables (PV/Batteries, PV/Batteries/éolienne) contribuent beaucoup plus à la protection de l'environnement. Néanmoins les autres solutions aussi peuvent participer à garantir une planète verte. Si 1 kWh électrique d'origine fossile produit environ 0,741 kg équivalent de CO<sub>2</sub> au Sénégal. Au bout de 25 ans ces émissions évitées auront des retombées économiques très importantes dans les structures avec les mécanismes de développement propre (MDP).



**Figure 45: émissions évitées par les solutions à taux de couverture 100%**

Ainsi, l'impact de ces émissions évitées par les solutions à taux de couverture variable est réalisé dans la figure 46. Malgré qu'elles soient des solutions en fonction de l'espace disponible, elles permettent de réduire des quantités très importantes de CO<sub>2</sub> par année comme le montre la figure 46. Sur celle-ci, on note que les solutions purement renouvelables permettent de réduire toutes les émissions dans toutes les structures sauf au niveau de la Nouvelle mairie. Pour le PV/réseau électrique, on note que plus la consommation couverte par le réseau est importante, plus la réduction d'émission est faible. La solution PV/Batteries/groupe a plus d'impact positif sur la réduction des émissions que le PV/réseau électrique. En effet, 90% de la production du réseau Sénégalais est assurée par les groupes Diesel [20]. Donc celle-ci causera plus de pollution environnementale qu'un seul groupe.

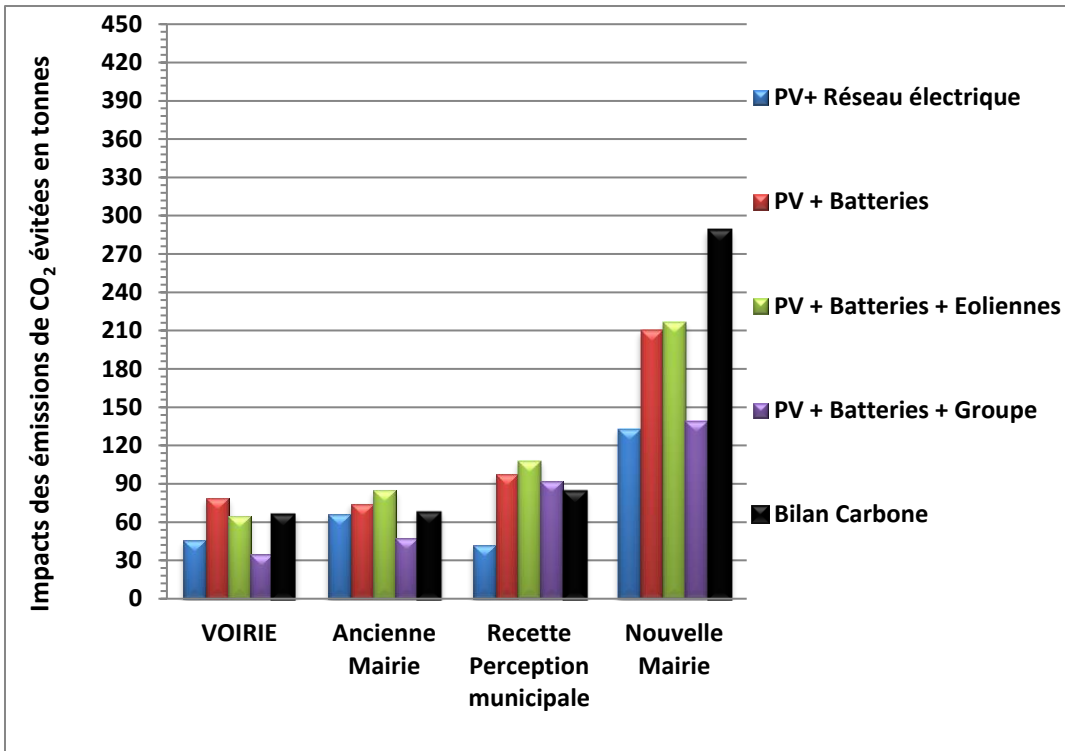


Figure 46: Impacte des émissions évitées sur le bilan Carbone

### Conclusion

En résumé, cette analyse technico-économique et environnementale de solutions d'énergies renouvelables proposées montre que toutes les solutions peuvent réduire les coûts de consommations et les émissions de GES pour ces structures. Cependant, les solutions purement renouvelables telles que PV/Batteries et PV/Batteries/éoliennes sont les meilleures solutions du point de vue environnemental. Du point de vue économique, le PV/réseau électrique est beaucoup plus rentable.

## Conclusion générale

Cette étude portant sur l'analyse technico-économique et de l'impact environnemental de solutions d'énergie renouvelable s'inscrit dans le cadre de la lutte contre les émissions de GES et à la réduction de la consommation des énergies fossiles aux structures de la Mairie de Ziguinchor. Le travail réalisé, consiste à utiliser des logiciels de dimensionnements pour étudier la faisabilité technico-économique et environnementale des solutions d'énergies renouvelables de façon autonomes ou selon l'espace disponible dans le bâti de ces structures. D'abord, le logiciel HOMER est utilisé pour proposer quatre types de solutions telles que PV/réseau, PV/batteries, PV/batteries/éolienne et PV/batteries/groupe avec des charges variant de 64 à 320 kWh/j qui ont été établi à partir du bilan de puissance réalisé lors des deux mois de séjour à la Mairie. Ainsi, des contraintes sont utilisées pour optimiser les résultats dans le but d'obtenir des coûts d'investissements et des prix de revient de l'énergie beaucoup plus avantageux. Ensuite pour ce qui est de RETScreen, il est utilisé pour exploiter l'espace disponible aux structures et aussi savoir certains paramètres tels que l'année de retour sur les capitaux investis, le TRI et la VAN. Les résultats obtenus sont analysés du point de vue économique et environnemental. Enfin l'analyse de l'impact des émissions évitées sur le bilan Carbone a été réalisée pour les solutions à taux de couverture de la charge à 100% ainsi que celles avec des taux de couverture variable. Les résultats ont montré que les émissions évitées augmentent avec la puissance renouvelable installée. Les solutions PV/Batteries et PV/Batteries/éolienne réduisent plus d'émissions. Donc, elles sont les meilleures solutions du point de vue environnemental. Mais économiquement le système PV/réseau est la meilleure.

En somme, ce travail d'analyse technico-économique et d'impact environnemental peut contribuer au développement de l'autoconsommation et l'autonomisation énergétique des bâtiments administratifs à haute consommation. C'est un travail qui peut servir aux autorités de la commune de Ziguinchor à la prise de décision dans le cadre du développement durable.

En perspectives, nous proposons d'implanter des stations de mesure pour mieux évaluer les potentiels ainsi que l'utilisation des instruments de mesure pour des profils de charges plus réalistes et l'application de l'une des solutions proposées.

Pour terminer ce travail, nous recommandons aux usagers de ces structures de mener des campagnes de sensibilisations sur l'efficacité énergétique.

## Références bibliographiques

- [1] O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, P. Matshoss, “Sources d ’ énergie renouvelable et atténuation du changement climatique,” p. 242, 2011.
- [3] F. TRAORE, “Etat des lieux non exhaustif sur les énergies renouvelables (EnRs) au Sénégal,” 2018.
- [4] Senelec, “The Electricity Sector in Senegal and Opportunities in Renewables,” pp. 8, 2016.
- [5] I. Pierre, S. Laplace, M. E. Bard, M. G. Flamant, M. A. Illingworth, and M. J. Grandpeix, “L ’ effet de serre : sa decouverte , son analyse par la méthode des puissances nettes échangées et les effets de ses variations récentes et futures sur le climat terrestre .” p. 107, 2009.
- [6] Trotignon, De Perthuis “La gouvernance internationale du climat,” *Paris Dauphine – Ec. Polytech*, programme de recherche en économie du climat de la Chaire Finance et Développement Durable, 12, février 2010, pp.401-413.
- [7] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, and W. Moufouma-Okia, “An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development,” *Working Group I Technical Support Unit*, p. 32, 2018.
- [8] S. Sall, “Le changement climatique: La situation mondiale et les négociations internationales,” 2011.
- [9] A. Balde, “TROISIEME COMMUNICATION NATIONALE DU SENEGAL A la Convention Cadre Des Nations-Unies Sur Les Changements Climatiques,” 2015.
- [11] F. Omar, “Mémoire de Magister Contribution à l’Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables,” p. 130, 2014.
- [12] PERACOD, “Le guide des acteurs privés et publics des énergies renouvelables au Sénégal,” 2011, p. 52.
- [14] K. Bruno, “Evaluation des émissions carbone du siège de la commission de l’union économique et monétaire ouest africaine (UEMOA),” p. 44, 2011.
- [15] International Energy Agency, “EMISSION FACTORS,” pp.34, 2018.

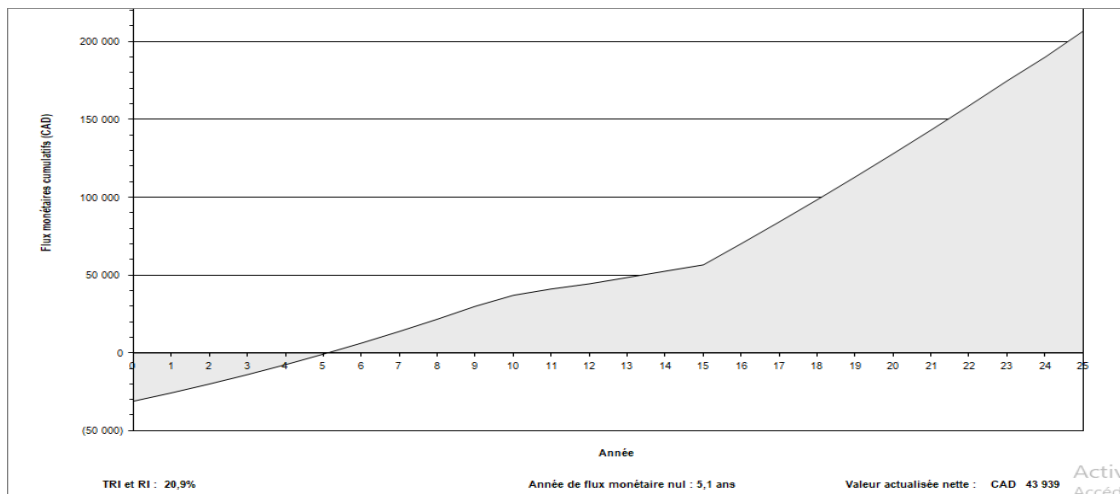
- [17] V. Demeusy, “Dimensionnement d’un système hybride photovoltaïque / groupe électrogène,” p. 24, 2011.
- [18] C. Mouhamed, “Analyse technico économique de solutions énergétiques utilisant les technologies solaires et éoliennes selon la classe de puissance sur divers sites d’implantation au Sénégal,” p. 74, 2013.
- [19] Z. Rima, “Etude de faisabilité technique et économique des installations solaires thermiques dans un bâtiment.” P. 195, 2012.
- [20] Senelec, “Plan stratégique 2016 - 2020,” p. 26, 2020.

### Sites web

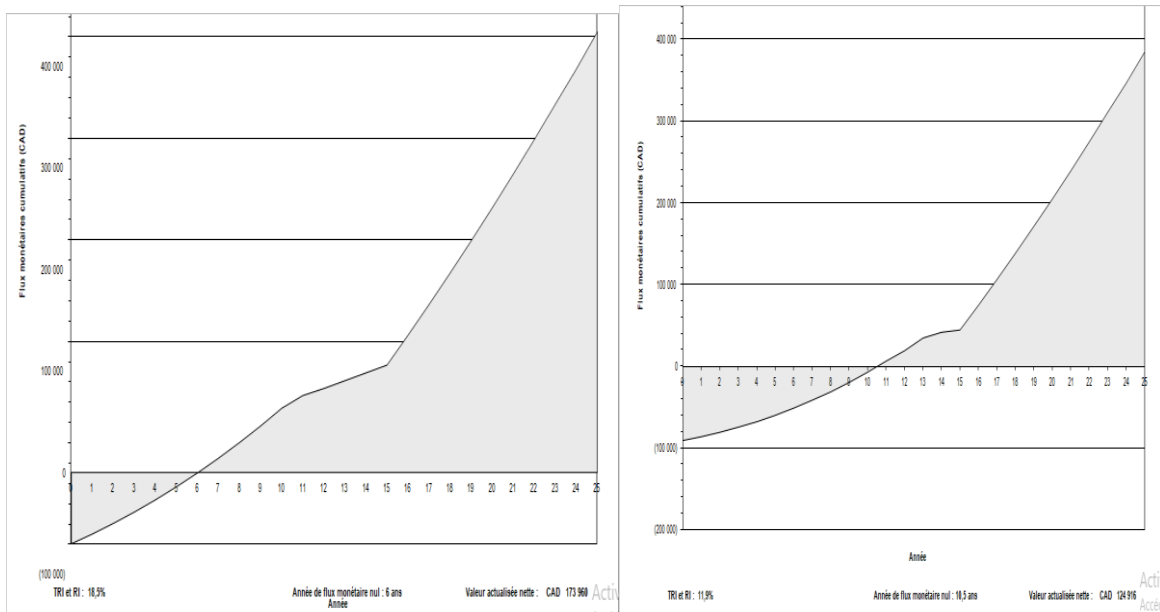
- [2] Dakar. (2018, septembre 10) <http://www.sie-energie.gouv.sn>.
- [10] Dakar. (2018, Octobre 20)  
<http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/tend/SEN/fr/EN.ATM.CO2E.PC.html>. Outil pédagogique des grandes tendances mondiales.
- [13] Ziguinchor. (2019, Mars 15) <https://joelec.fr/blog/electricite-generale/chute-de-tension-electrique/>
- [16] Dakar. (2019, Novembre 16) <http://www.shemas-energies-renouvelables>.

## Annexe

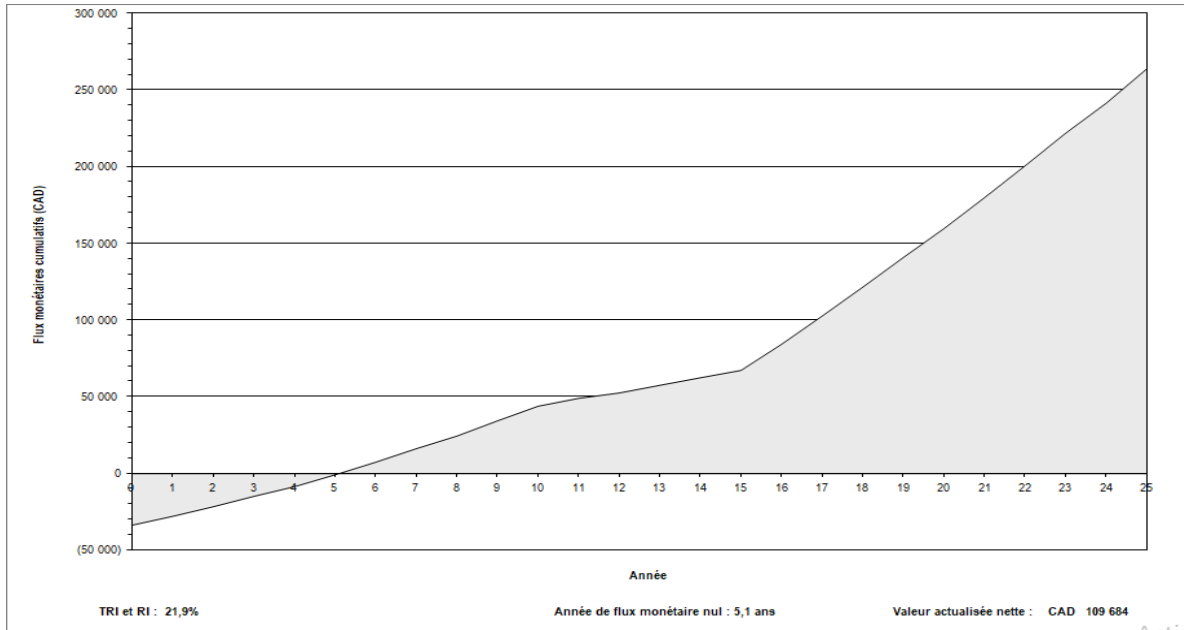
### Annexe 1: Graphe du flux monétaire pour la solution PV/intègre au réseau Voirie



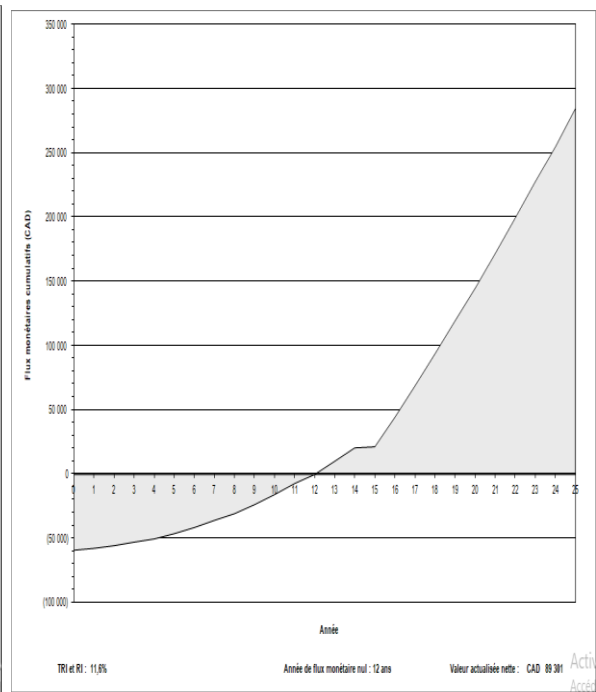
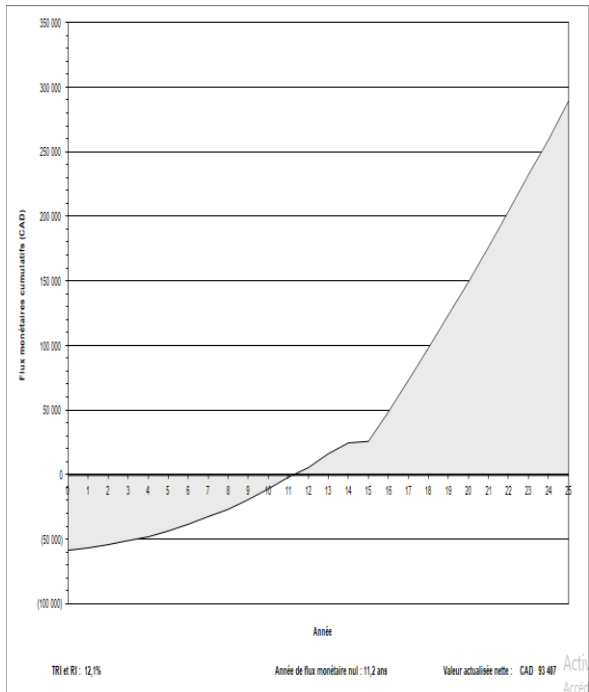
### Annexe 2: Graphe du flux monétaire pour les solutions PV/batteries et PV/batteries/groupe VOIRIE



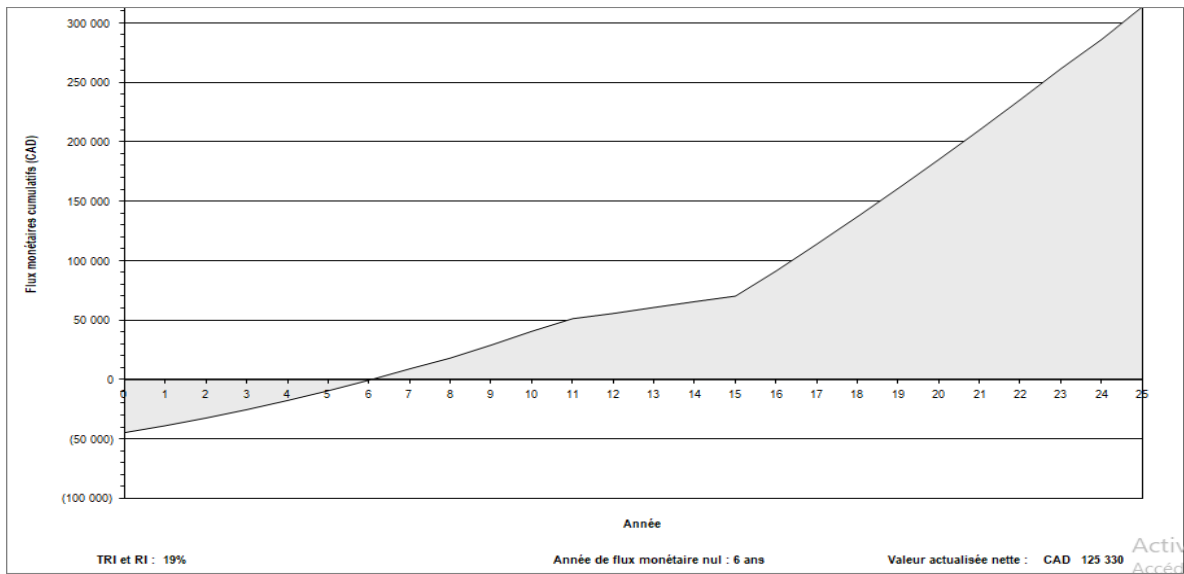
### Annexe 3: Graphe du flux monétaire pour la solution PV/intégré au réseau électrique Ancienne Mairie



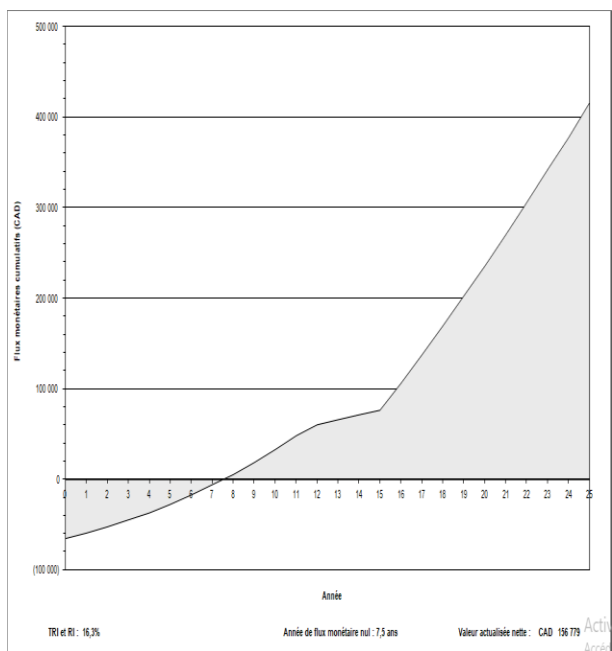
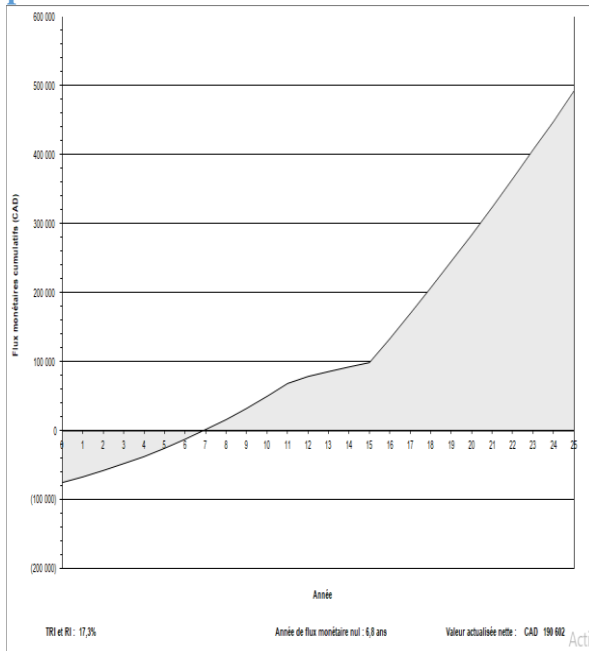
### Annexe 4: Graphe du flux monétaire pour la solution PV/batteries et PV/batteries/groupe Ancienne Mairie



## Annexe 5: Graphe du flux monétaire pour la solution PV/intégré au réseau électrique RPM

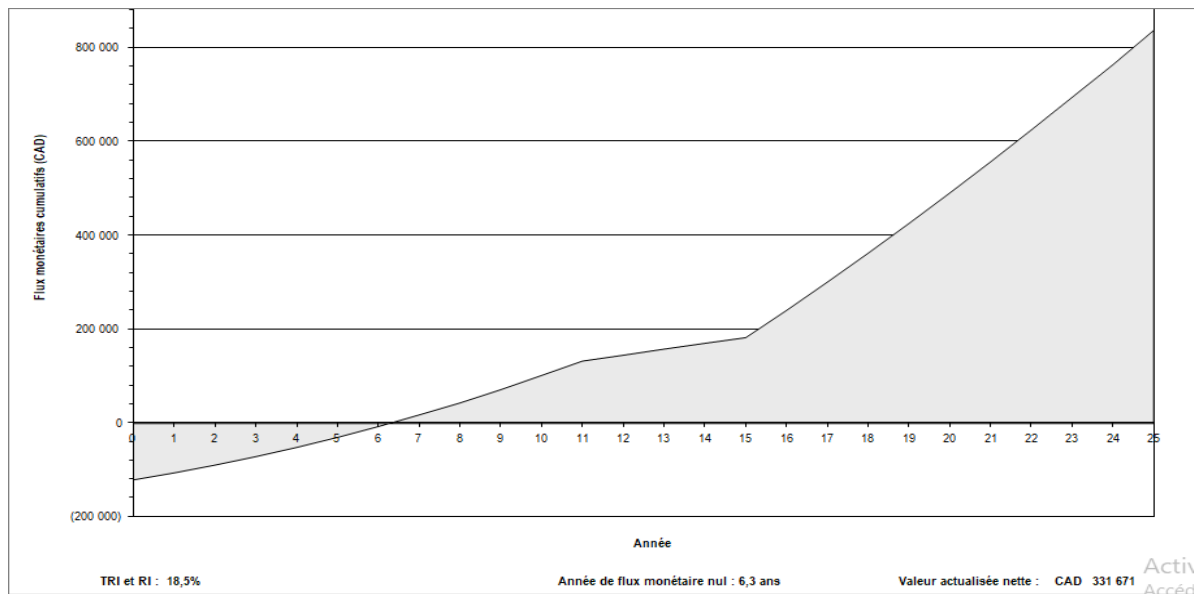


## Annexe 6: Graphe du flux monétaire pour la solution PV/batteries et PV/batteries/groupe pour la RPM





## Annexe 7: Graphe du flux monétaire pour la solution PV/intégré au réseau électrique Nouvelle Mairie



## Annexe 8: Graphe du flux monétaire pour la solution PV/batteries et PV/batteries/groupe pour la Nouvelle Mairie

