

# Université Assane Seck de Ziguinchor



UFR Sciences et Technologies

Département de physique

**Mémoire de Master**

Mention : 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 l'université de Ziguinchor**

Présenté par :

**Mamadou Ndour**

Sous la supervision de :

**Dr. Ababacar Ndiaye**

Soutenu publiquement le 20/04/2019 devant le jury composé de :

Prénom et Nom	Grade	Qualité	Etablissement
Lat Grand Ndiaye	Maître-Conférences	Président	UASZ
Moustapha Thiame	Maître-Assistant	Rapporteur	UASZ
Samo Diatta	Maître –Assistant	Examineur	UASZ
Modou Tine	Assistant	Examineur	UASZ
Ababacar Ndiaye	Maître –Assistant	Encadrant	UASZ

Année académique 2017-2018

## Dédicaces

*Je dédie ce travail, à toute ma famille.  
Particulièrement à ma feuie grande mère  
Nguenar Ndiaye,  
à mon père Samba Ndour, ma mère Fatou  
Tambédou,  
à mon grand frère, mon ami Papa Ibrahima  
Ndour.  
Que DIEU vous garde et vous couvre de grâce.*

## Remerciements

Je remercie le bon Dieu de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Ce travail a été effectué à l'université **Assane Seck de Ziguinchor (UASZ)** et au Laboratoire d'Océanographie des Sciences de l'Environnement et du climat (L.O.S.E.C.). Avant de présenter les résultats du travail, il est important pour moi de témoigner ici une grande reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidé à son aboutissement. Je tiens sincèrement à remercier :

En premier lieu, le Docteur Ababacar Ndiaye, mon encadreur à qui j'exprime toute ma reconnaissance pour avoir accepté de conduire ce mémoire malgré ses multiples occupations. Pour votre confiance en mon travail, votre patience, vos nombreux conseils, votre disponibilité, veuillez trouver ici, l'expression de ma sincère et profonde gratitude ;

Je remercie également les membres du jury, avec à sa tête Dr Lat Grand Ndiaye, à Dr Moustapha Thiame, à Dr Samo Diatta, à Dr Modou Tine pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail. Je remercie les enseignants chercheurs du département de Physique : Dr Bamol Ali Sow, Dr Moctar Camara, Dr Mamadou Lamine Mbaye, Dr Diouma Kobor, Dr Ibrahima Sakho.

Je remercie M. Cheikh Ahmadou Bamba Fall directeur de la Direction de la Gestion du Patrimoine et la Maintenance (DGMP) de m'avoir facilité le travail au sein de l'université.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de tous les doctorants du laboratoire physique de L.O.S.E.C et L.C.P.M (laboratoire de chimie physique des matériaux) : Dr Ibrahima Diba, Dr Alioune Badara Sarr, M. Hamady Ngansou Sabaly, M. Jules Basse, M. Moustapha Sow, M. Cheikh Waly Diédhiou, M. Youssouf Coly, M. Abdourahmane Diallo, M. Mamadou Diouldé Bâ pour tous leurs conseils et aides.

Je ne saurais terminer sans pour autant remercier toute la promotion (Mme Arame Diéye, M. Malick Mbengue, M. Sambalaye Diop, M. Serigne Mbacké Coly, M. Birane Ndom, M. Youssoupha Cissé, Mme Khadidiatou Sy, Mme Marie André Faye, M. Youssouph Badji, M. Pierre Malang Sadio, M. Lamine Konté) qui a été une deuxième famille durant toute la formation.

J'adresse des remerciements particuliers à ma famille pour m'avoir toujours poussée à poursuivre mes études. Vous m'avez encouragé et donné de la force. Je suis très reconnaissant à ma mère et à mon père pour m'avoir donné une bonne éducation. Un grand merci à ma mère qui m'a toujours fait confiance dans mes études et m'a soutenu dans tous les domaines. Je voudrais aussi remercier mes frères et sœurs qui m'ont toujours aidé et soutenu : M. Papa Ibrahima Ndour, M. Babacar Ndour, M. Pape Ly, M. Laity Ndiaye, M. Waly Ndour, M. Mounirou Ndour, Mme Fatou Ndour Faye, Mme Diouly Ndour, Mme Ndéye goné Ndour, Mme Mariama Ndour.

J'adresse aussi mes remerciements à mes deux adorables femmes, Khoudia Ndiaye et Diarra Ba.

Je remercie également Mme Nogaye Fall Sylla et Mme Mariama Sane Diop, M. Thierno Sellou Sall et M. Alioune Sall ainsi que leurs familles respectives pour tout leur soutien.

## **Résumé :**

Ce travail constitue une contribution à la valorisation des énergies renouvelables et à la réduction des émissions de GES au Sénégal. Il est consacré à l'étude technico-économique et l'impact environnemental de la mise en place de solutions d'énergies renouvelables (solaire photovoltaïque et/ou éolien) pour la production d'électricité à l'université Assane Seck de Ziguinchor. C'est en ce sens, compte tenu de la forte demande énergétique et de la facture énergétique élevée de l'université, que l'intégration de systèmes d'énergies renouvelables autonomes ou connectés au réseau serait une alternative pour alléger la facture énergétique d'une part. Ces systèmes contribueront, d'autre part, à préserver l'environnement des émissions des gaz à effet de serre d'origine fossile (SENELEC). Ils sont techniquement et économiquement étudiés pour répondre aux besoins énergétiques de manière totale (100% de couverture de la charge) ou partielle (30 et 50% de couverture de la charge). Ainsi, l'étude de différentes combinaisons de systèmes avec les outils HOMER et RETScreen est effectuée en situation hors réseau (Off Grid) et connecté au réseau (On Grid) sur une période de 25 ans. HOMER est utilisé pour les solutions hybrides telles que PV + batterie + éolien + réseau. Des contraintes d'optimisations ont été appliquées afin d'obtenir des solutions optimales techniquement et économiquement. RETScreen a permis d'obtenir le retour sur investissement, le taux de rendement interne (TRI) et la valeur actualisée nette (VAN). Il a également permis d'optimiser la surface occupée par les champs photovoltaïques. Les profils de charge utilisés dans ce travail ont été établis à partir du bilan de puissance. Ceux-ci montrent que le pic de puissance de l'université est de 150 kW et que la consommation moyenne journalière est de 743,57 kWh. Les résultats ont montré que les solutions connectées au réseau (SENELEC) sont les meilleures sur le plan économique. En effet, elles présentent les coûts d'investissement et les temps de retour sur investissement les plus faibles (moins de 3 ans).

Sur le plan environnemental, les résultats ont montré que la solution autonome purement renouvelable (PV+ batteries) est la plus intéressante. Elle permet de réduire 623,11 tonnes de CO<sub>2</sub> contre 562,419 tonnes émises par an par l'UASZ pour une consommation purement fossile.

**Mots clés :** Photovoltaïque, Eolien, Systèmes hybrides, Technico-économique, Impact environnemental

**Abstract:**

This work is a contribution to the development of renewable energies and the reduction of greenhouse gases release in Senegal. It is devoted to the technical-economic study and the environmental impact of the implementation of renewable energy solutions (solar photovoltaic and / or wind energy) for electricity generation at Assane Seck University in Ziguinchor. It is all in that sense, given the high energy demand and the high energy bill of the university, the integration of stand-alone or grid-connected renewable energy systems would be an alternative to reduce the energy bill on the one hand. On the other hand, these systems will contribute to preserving the environment from fossil fuels (SENELEC). They are technically and economically designed to meet the energy needs in a total (100% load coverage) or partial (30 and 50% load coverage). Thus, the study of different combinations of systems with the HOMER and RETScreen tools is carried out in Off Grid and On Grid over a period of 25 years. HOMER is used for hybrid solutions such as PV + battery + wind + grid. Optimization constraints have been applied in order to obtain optimal solutions technically and economically. RETScreen provided return on investment, internal rate of return (IRR) and net present value (NPV). It has also optimized the area occupied by photovoltaic fields. The load profiles used in this work were derived from the power budget. It showed that the peak power of the university is 150 kW and the average daily consumption is 743.57 kWh. The results showed that network-connected solutions (SENELEC) are the best economically. Indeed, they have the lowest investment costs and return on investment time (less than 3 years). On the environmental front, the results showed that the purely renewable autonomous solution, PV + batteries, is the most interesting. It reduces 623.11 tons of CO<sub>2</sub> against 562.419 tons emitted by the ASUZ for purely fossil consumption.

**Keywords:** Photovoltaic, Wind energy, Hybrid systems, Technico-economic, Environmental impact

## **Liste des abréviations**

UASZ : Université Assane Seck de Ziguinchor

EnR : énergie renouvelable

GES : Gaz à effet de serre

PV : Photovoltaïque

SHSER : Système hybride à sources d'énergie renouvelables

CC : Convertisseur continu

CA : Convertisseur Alternatif

Pc: Puissance crête

kW: kilo Watt

kWc: kilo Watt crête

kWh : kilo watt heure

MWh : Méga Watt heure

K : Coefficient de perte

Pins. : Puissance à installer

Ireg : Intensité reçue par le régulateur

Nreg : Nombre de régulateurs

Cb : Capacité de la batterie

Pond : puissance de l'onduleur générale

$P_i$  : La puissance de l'appareil électrique i

$t_i$  : la durée de fonctionnement de l'appareil électrique i

$E_i$  : L'énergie consommée par appareil électrique i

$E_c$  : L'énergie journalière consommée

GIEC : Groupe d'expert Intergouvernemental

SIE : Système d'information Energétique

SENELEC : Société Nationale d'électricité

## **Table des Matières**

Dédicaces.....	i
Remerciements .....	ii
Résumé : .....	iii
Abstract :.....	iv
Liste des abréviations .....	v
Table des Matières.....	vi
Introduction Générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les Energies solaire et éolienne .....</b>	<b>3</b>
Introduction .....	3
I.1. Energie Solaire.....	3
I.1.1. Energie solaire photovoltaïque .....	3
I.1.1.1. Définition .....	3
I.1.1.2. Technologie solaire et système photovoltaïque .....	3
I.1.1.2.1. Effet photovoltaïque.....	3
I.1.1.2.2. Principe de fonctionnement .....	3
I.1.1.3. Les Composants d'une installation photovoltaïque .....	4
I.1.1.3.1. Les Modules photovoltaïques .....	4
I.1.1.3.2. Le Convertisseur .....	5
I.1.1.3.3. Les batteries .....	6
I.1.1.3.4. Le Régulateur.....	6
I.1.1.4. Les paramètres des cellules photovoltaïques .....	7
I.2. Energie éolienne.....	7
I.2.1. Définition .....	7
I.2.2. Les différents types d'éoliennes.....	8
I.2.2.1. Eolienne à axe horizontal.....	8
I.2.2.2. Eolienne à axe vertical .....	8
I.2.3. Principe de fonctionnement .....	9
I.3. Le Potentiel solaire et éolien au Sénégal .....	10
I.3.1. Le Potentiel solaire .....	10
I.3.2. Le Potentiel éolien .....	10
I.4. Différents types d'utilisation.....	12

I.4.1. Systèmes Autonomes .....	12
I.4.2. Système hybride .....	12
I.4.3. Système connecté au réseau .....	13
Conclusion.....	13
<b>Chapitre II : Données et Méthodes .....</b>	<b>14</b>
Introduction .....	14
II.1. Présentation architecturale de l'Université Assane Seck de Ziguinchor.....	14
II.2. Méthodologie .....	15
II.2.1. Identification des appareils .....	15
II.2.2. Relevés des puissances .....	15
II.2.3. Calcul de la puissance des différents blocs .....	15
II.2.4. Enquête sur les heures de fonctionnement .....	16
II.2.5. Calcul de la consommation énergétique journalière .....	16
II.2.6. Dimensionnement manuel .....	16
II.2.7. Présentation des logiciels HOMER et RETScreen.....	19
II.2.7.1. HOMER.....	19
II.2.7.2. RETScreen.....	20
II.3. Présentation des Données : .....	21
II. 3.1. Bilan de Puissance .....	21
II.3.1.1. Profil de charge journalière de L'UASZ .....	21
II.3.1.1.1. Profil de charge du Bloc Scientifique.....	21
II.3.1.1.2. Profil de charge des Bâtiments UFR .....	22
II.3.1.1.3. Profil de charge des autres structure de l'UASZ.....	23
II.3.1.1.4. Profil de charge de l'Université Assane Seck de Ziguinchor.....	24
II.3.1.2. Bilan de la consommation Energétique journalière .....	25
II.3.1.2.1. Bilan énergétique journalier du bloc Scientifique.....	26
II.3.1.2.2. Bilan énergétique journalier des UFR .....	26
II.3.1.2.3. Bilan énergétique journalier de l'UASZ .....	27
II.4. Répartition de la consommation énergétique par équipement .....	29
Conclusion.....	30
<b>Chapitre III: Etude technique : dimensionnement des solutions .....</b>	<b>31</b>

Introduction .....	31
III.1. Dimensionnement des solutions proposées.....	31
III.1.1. Solution A.....	32
III.1.1.1. Dimensionnement du champ PV .....	32
III.1.1.2. Dimensionnement du régulateur et de l'onduleur.....	33
III.1.1.3. Dimensionnement du stockage (batteries) .....	33
III.1.2. Solution B :.....	33
III.1.2.1. Description du système .....	33
III.1.2.2. Dimensionnement des composants du système .....	34
III.1.2.2.1. Dimensionnement du champ PV.....	34
III.1.2.2.2. Dimensionnement de l'onduleur .....	34
III.1.2.2.3. Dimensionnement du stockage .....	35
III.1.2.2.4. Dimensionnement du réseau .....	35
III.1.3. Solution C :.....	35
III.1.3.1. Dimensionnement du champ PV .....	35
III.1.3.2. Dimensionnement du stockage .....	35
III.1.3.3. Dimensionnement du réseau .....	35
III.1.4. Solution D.....	36
III.1.4.1. Description du système .....	36
III.1.4.2. Dimensionnement du champ PV .....	36
III.1.4.3. Dimensionnement du stockage .....	36
III.1.4.4. Dimensionnement de l'éolienne.....	37
III.1.4.5. Dimensionnement du réseau .....	37
Conclusion.....	37
<b>Chapitre IV : Etude Economique et Environnementale .....</b>	<b>38</b>
Introduction .....	38
IV.1. Etude Economique .....	38
IV.1.1 Solution A : .....	38
IV.1.1.1. Estimation des coûts.....	38
IV.1.1.2. Variabilité et rentabilité financière .....	39
IV.1.2. Solution B.....	39
IV.1.2.1. Estimation des coûts.....	39

IV.1.2.2. Variabilité et rentabilité financière .....	40
IV.1.3. Solution C : .....	41
IV.1.3.1. Estimation des coûts.....	41
IV.1.3.2. Variabilité et rentabilité financière .....	41
IV.1.4. Solution D .....	42
IV.1.4.1. Estimation des coûts.....	42
IV.1.4.2. Variabilité et rentabilité financière .....	42
IV.2. Etude d'impact Environnemental .....	42
IV.2.1. Bilan Carbone.....	43
Conclusion.....	45
Conclusion générale .....	46
BIBLIOGRAPHIE.....	48
Annexe 1 : Bilan énergétique .....	I
Annexe 2: Flux monétaire cumulatif des différentes solutions.....	II

## LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

### Liste des figures

Figure 1: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [15] .....	4
Figure 2: Convertisseur solaire [16].....	6
Figure 3: Batteries au plomb fermées [17].....	6
Figure 4: Contrôleur de charge de type MPPT [18].....	6
Figure 5: Courbe courant-tension [19].....	7
Figure 6: Conversion de l'énergie cinétique du vent [4] .....	8
Figure 7: Technologies d'éoliennes .....	9
Figure 8: Répartition du potentiel éolien au Sénégal [21] .....	11
Figure 9: La Rose des vents à l'UASZ.....	11
Figure 10: Distribution de Weibull de la vitesse des vents à l'UASZ .....	11
Figure 11: Répartition des systèmes hybrides.....	13
Figure 12: Présentation de l'université Assane Seck de Ziguinchor .....	14
Figure 13: Organigramme des structures de l'Université .....	15
Figure 14: Interface principale de HOMER.....	19
Figure 15: Fenêtre d'accueil de RETScreen .....	20
Figure 16: Profil de charge de laboratoire physique .....	21
Figure 17: Profil de charge de laboratoire de géographie .....	22
Figure 18: Profil de charge de Laboratoire d' Agroforesterie .....	22
Figure 19: Profil de charge de laboratoire chimie.....	21
Figure 20: Profil de charge de l'UFR des Sciences et Technologies .....	22
Figure 21: Profil de charge de l'UFR des Sciences Economies et Sociales.....	22
Figure 22: Profil de charge de l'UFR des Sciences de la Santé .....	22
Figure 23: Profil de charge de l'UFR des Sciences Economies et Sociales.....	22
Figure 24: Profil de charge du Centre des ressources Informatiques .....	24
Figure 25: Profil de charge de la Direction de la Gestion du Patrimoine et de la Maintenance (DGPM) .....	23
Figure 26 : Profil de charge des salles Informatiques .....	24
Figure 27 : Profil de charge du Campus Numérique .....	24
Figure 28: Profil de charge des Salles de Cours .....	24
Figure 29: Profil de charge de l'Agence Comptable.....	23
Figure 30: Profil de charge de la bibliothèque .....	23
Figure 31 : Profil de Charge du Rectorat .....	23
Figure 32: Profil de l'Université Assane Seck de Ziguinchor obtenu par dimensionnement.....	25
Figure 33: Profil de charge de l'université obtenu par le Réseau SENELEC en période de vacance .....	25
Figure 34: Consommation Energétique journalière du Bloc Scientifique .....	26

Figure 35: Consommation Energétique journalière des UFR.....	27
Figure 36: répartition de la consommation énergétique journalière des différentes structures de l'université Assane Seck de Ziguinchor .....	28
Figure 37: Répartition de la consommation énergétique des différents équipements de l'UASZ.....	30
Figure 38: Schéma des solutions proposées.....	31
Figure 39: Représentation du système utilisé : PV + batterie.....	32
Figure 40: Moyenne mensuelle de la puissance du champ PV.....	33
Figure 41: Représentation du système utilisé : PV + batterie + Réseau [19] .....	34
Figure 42: Représentation du système utilisé pour la solution D. [16].....	36
Figure 43: La répartition des coûts d'investissements de la solution A.....	39
Figure 44: La répartition des coûts d'investissements de la solution B .....	40
Figure 45: gaz à effet de serre émis et à éviter.....	44

## **Liste des tableaux**

Tableau 1: Comparatif des différentes technologies.....	5
Tableau 2: Gisement solaire des grandes villes du Sénégal [20].....	10
Tableau 3: Tableau de synthèse de puissance et de la consommation énergétique .....	29
Tableau 4: Coûts d'investissements de la solution A .....	38
Tableau 5: Coûts d'investissements de la solution B .....	40
Tableau 6: Coûts d'investissements de la solution C .....	41
Tableau 7: Coûts d'investissements de la solution D .....	42
Tableau 8: Tableau de Synthèse.....	45

## **Introduction Générale**

L'accessibilité et l'autonomisation en énergie sont actuellement devenues un défi majeur à relever pour l'Afrique aussi bien pour des raisons écologiques, qu'économiques. La demande énergétique ne cesse d'augmenter dans les sociétés industrialisées et les pays en voie de développement. Au Sénégal, la consommation énergétique moyenne par personne est passée de 73,83 kWh/an en 1971 à 223,23 kWh/an en 2014 selon la banque mondiale avec une grande partie constituée d'énergies fossiles et du bois de chauffe [1]. Les produits pétroliers assurent 46.6 % de cette demande, la biomasse (bois de chauffe et charbon de bois) 54.3% et l'énergie solaire une très petite partie (2010) [2]. À l'université Assane Seck de Ziguinchor, notre zone d'étude, plus de 99% de son approvisionnement est fourni par l'énergie conventionnelle (SENELEC). Cependant les énergies solaires plus précisément le photovoltaïque est faiblement utilisé. Il faut noter que l'utilisation de ces types d'énergies (énergies fossiles) participe aux émissions de gaz à effet de serre et par conséquent au réchauffement climatique. Ainsi pour préserver l'environnement, l'utilisation et la valorisation des énergies alternatives autrement dit énergies renouvelables sont devenues incontournables. Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui se régénèrent naturellement et dont le processus de renouvellement est assez rapide pour que la ressource soit considérée comme inépuisable à l'échelle humaine. Elles sont principalement constituées du solaire photovoltaïque, du solaire thermique, de l'éolien, de la biomasse, de l'hydroélectrique et de la géothermie entre autres. Elles sont dites propres car leur utilisation n'engendre pas des émissions de gaz à effet de serre. En plus, elles ne constituent pas un facteur de conflit entre les pays car le potentiel est largement abondant et bien réparti (solaire, éolien) en Afrique contrairement aux énergies fossiles comme le pétrole.

A l'université Assane Seck de Ziguinchor, la facturation énergétique prend une partie très importante dans son budget, d'où le besoin de trouver des solutions qui permettent

d'économiser. D'un autre coté dans sa politique environnementale, elle veut participer à la réduction des émissions des gaz à effet de serre et pour cela ; il faut diminuer l'utilisation d'énergie d'origine fossiles. C'est dans ce cadre que ce mémoire a pour objectif de proposer des solutions d'énergies renouvelables qui permettront de diminuer la facturation énergétique de l'université d'une part. D'autre part, ses solutions devront permettre à l'université de participer à la protection de l'environnement.

Ainsi, ce mémoire s'articule autour de quatre (4) chapitres. Le premier chapitre porte sur la revue de la littérature, les généralités sur les énergies solaire et éolienne. Le second chapitre sera consacré à la description des données utilisées et de la méthodologie adoptée. Le troisième chapitre est consacré au dimensionnement et à l'optimisation énergétique des systèmes. Enfin le dernier chapitre est réservé à l'étude économique et environnementale des solutions proposées.

# **Chapitre I : Généralités sur les Energies solaire et éolienne**

## **Introduction**

Ce chapitre est consacré aux généralités sur les énergies renouvelables en particulier solaire et éolienne. La première partie sera dédiée aux énergies solaires plus précisément le photovoltaïque, à son principe de fonctionnement et à l'étude de son potentiel. Pour la deuxième partie, elle sera consacrée à l'énergie éolienne, à son principe de fonctionnement ainsi que l'étude de son potentiel au Sénégal. Nous terminerons ce chapitre par une étude des différents types d'utilisation des énergies renouvelables.

## **I.1. Energie Solaire**

### **I.1.1. Energie solaire photovoltaïque**

#### **I.1.1.1. Définition**

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie récupérée et convertie directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. En effet, elle est obtenue par la conversion directe de photons en électrons à l'aide de matériaux spécifiques, de semi-conducteurs comme le Silicium, le Tellure de Cadmium (Cdte), l'Arséniure de gallium (AsGa) et le Cuivre-Indium disulfure (CuInS<sub>2</sub> ou CIS).

#### **I.1.1.2. Technologie solaire et système photovoltaïque**

##### **I.1.1.2.1. Effet photovoltaïque**

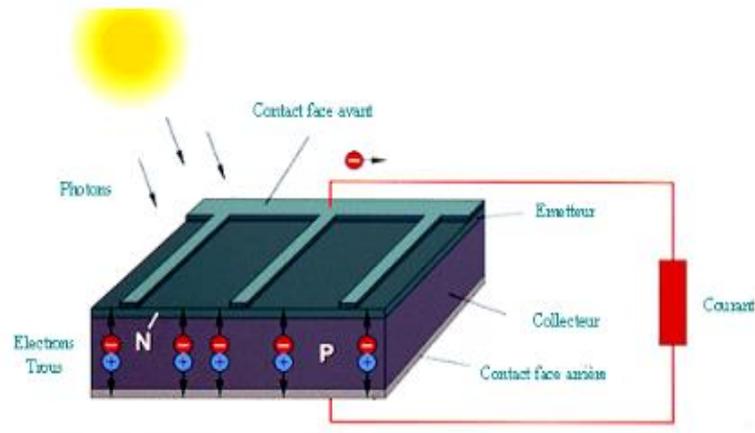
L'effet photovoltaïque est un phénomène de transformation directe des particules photons de l'énergie lumineuse issue des rayons solaires en électricité à l'aide de matériaux semi-conducteurs qui constituent les cellules photovoltaïques.

Il a été découvert en 1839 par un physicien français EDMOND BECQUEREL.

##### **I.1.1.2.2. Principe de fonctionnement**

La cellule photovoltaïque est constituée de deux couches de silicium, l'une est dopée avec du Phosphore (P) c'est la couche N (chargée négativement) et l'autre dopée avec le Bore (B) chargée positivement c'est la couche P. On obtient ainsi un champ électrique au sein du semi-conducteur et cette région est appelé jonction PN. Ce champ électrique s'accompagne avec une différence de potentielle électrique entre la zone N et la zone P. Lorsque les rayons du soleil

arrivent sur la cellule PV, les photons de la lumière transmettent leurs énergies aux électrons qui sont arrachés aux atomes dans lesquels ils laissent des trous. Les électrons et les trous ainsi formés vont avoir tendance à se recombiner. Mais lorsque le phénomène a lieu dans la jonction PN ou au voisinage, le champ électrique va contribuer à séparer les charges positives et les charges négatives ; les électrons repoussés dans la couche N et les trous dans la couche P. Les électrons cherchant à se recombiner avec les trous sont obligés de passer par un circuit extérieur pour rejoindre les trous créant ainsi un courant électrique continu.



**Figure 1:** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [15]

### **I.1.1.3. Les Composants d'une installation photovoltaïque**

#### **I.1.1.3.1. Les Modules photovoltaïques**

Les modules photovoltaïques ou panneaux solaires sont les piliers du système. Ils délivrent l'électricité dérivée du soleil.

Il existe différents types de cellules solaires photovoltaïques :

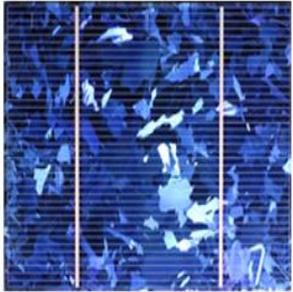
- **Les cellules monocristallines** : la structure du cristal est parfaitement homogène car les cellules sont issues d'un même cristal de silicium. Sa couleur caractéristique est parfaitement bleu en générale. Les cellules photovoltaïques monocristallines ont un rendement moyen de 19%

- **Les cellules poly-cristallines** : la structure du cristal n'est pas homogène car les cellules sont composées de plusieurs cristaux de silicium de tailles différentes et variées. Sa couleur caractéristique se rapproche plutôt du bleu. Leur rendement moyen est de 15%

- **Les cellules Amorphes** : Elles sont utilisées le plus souvent dans les calculettes à cause de leur rendement faible

Le tableau 1 permet de faire une comparaison entre les différentes technologies des cellules photovoltaïques [13].

**Tableau 1:** Comparatif des différentes technologies

Modules	Caractéristiques
<p><b>Monocristallin</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très bon rendement : 14 à 19 %.</li> <li>- Durée de vie : importante (30 ans)</li> <li>- Coût de fabrication : élevé.</li> <li>- Puissance : 100 à 150 Wh/m<sup>2</sup>.</li> <li>- Rendement faible sous un faible éclairage.</li> <li>- perte de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>- Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal</li> <li>- Couleur bleue uniforme</li> </ul>
<p><b>Polycristallin</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon rendement : 11 à 15 %.</li> <li>- Durée de vie : importante (30 ans)</li> <li>- Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins</li> <li>- Puissance : 100 Wh/m<sup>2</sup>.</li> <li>- Rendement faible sous un faible éclairage.</li> <li>- Perte de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>- Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.</li> <li>- Ces cellules sont bleues, mais non uniforme</li> </ul>
<p><b>Amorphe</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rendement faible : 5 à 9 %.</li> <li>- Durée de vie : assez importante (20 ans)</li> <li>- Coût de fabrication : peu coûteux par rapport aux autres technologies</li> <li>- Puissance : 50 Wh/m<sup>2</sup>.</li> <li>- Fonctionnement correct avec un éclairage faible.</li> <li>- Peu sensible aux températures élevées.</li> <li>- Utilisables en panneaux souples.</li> <li>- Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium.</li> <li>- Rendement faible en plein soleil.</li> <li>- Performances diminuant avec le temps.</li> <li>- Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.</li> </ul>

### **I.1.1.3.2. Le Convertisseur**

Il existe deux types de convertisseurs :

- Les Convertisseurs de type CC/CC sont utilisés uniquement pour les charges continues

➤ Le convertisseur CC/AC ou onduleur permet de transformer le courant continue délivré par les panneaux solaires en courant alternatif pour alimenter les charges alternatives. Lors du choix d'un onduleur, les paramètres suivants doivent être tenus en compte :

- A la borne d'entrée
  - La puissance nominale
  - La tension nominale
- A la borne de sortie
  - La puissance nominale
  - La tension et la fréquence nominale
  - Le rendement



**Figure 2 :** Convertisseur solaire [16]

### **I.1.1.3.3. Les batteries**

Elles constituent le maillon le plus faible du système. Sa fonction principale est le stockage en courant continu de l'énergie produite pendant la journée par voie chimique. L'énergie peut être utilisée pendant la nuit ou en cas de besoin. Les batteries sont importantes pour des systèmes isolés. Le calcul de la capacité de l'accumulateur tient en compte le besoin énergétique journalier de la structure, du nombre de jour d'autonomie voulu, de la tension du système ainsi que de la profondeur de décharge.

Les batteries sont choisies en fonction des caractéristiques suivantes :

- Capacité
- Tension
- Profondeur de décharge
- Niveau de charge
- Cycle de vie



**Figure 3:** Batteries au plomb fermées [17]

### **I.1.1.3.4. Le Régulateur**

Le régulateur de charge est le cerveau de l'installation, il joue un rôle de jonction entre les panneaux photovoltaïques, la batterie de stockage et les charges. Le contrôleur de charge protège la batterie en régulant sa charge et sa décharge, augmente la durée de vie de la batterie et aussi optimise la production d'énergie des panneaux.

Les caractéristiques importantes pour le choix du régulateur de charges adapté sont :



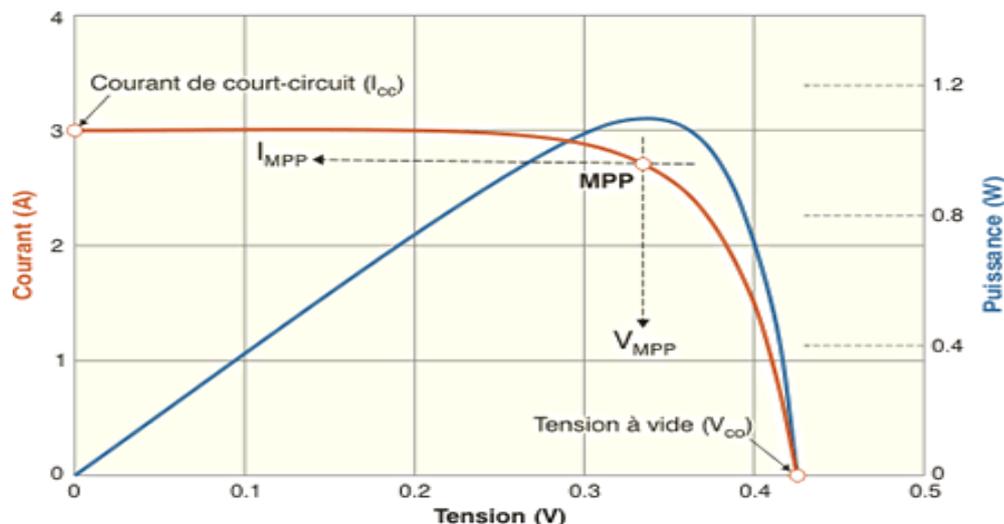
**Figure 4 :** Contrôleur de charge de type MPPT [18]

- L'intensité du courant photovoltaïque maximum
- La tension de fonctionnement ou d'utilisation
- Le courant maximum d'alimentation

#### **I.1.1.4. Les paramètres des cellules photovoltaïques**

Sous une lumière donnée, une courbe (figure 5) courant-tension (I-V) caractérise une cellule photovoltaïque. Cette courbe résume les configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques permettent d'expliquer la courbe.

- La tension à vide :  $V_{co}$ . C'est la valeur de la tension à circuit ouvert lorsque la cellule est éclairée non raccordée.
- le courant court-circuit:  $I_{cc}$ . C'est la valeur du courant obtenue par une cellule éclairée et raccordée à elle-même.
- Le point de puissance maximale : MPP obtenu pour une tension et un courant optimaux :  $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$  (appelés aussi parfois  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ).

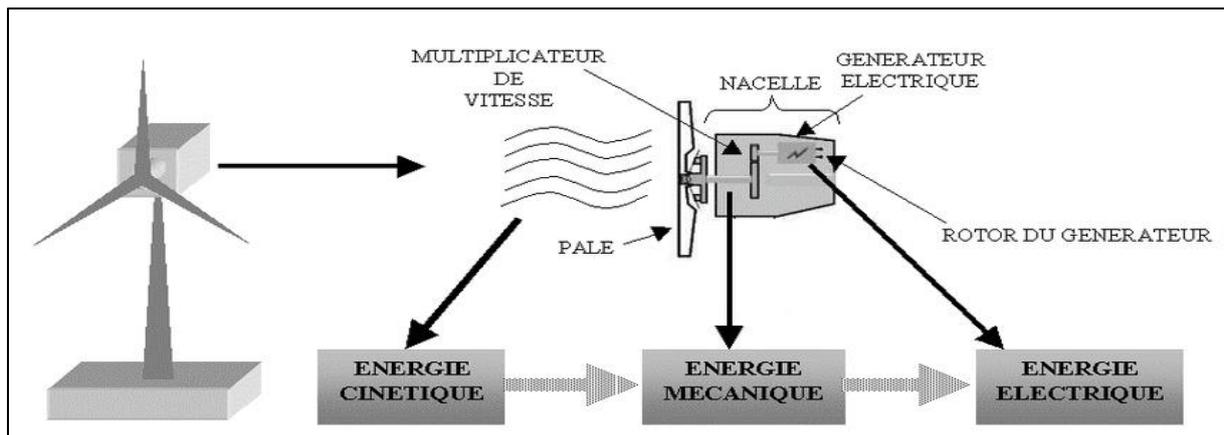


**Figure 5:** Courbe courant-tension [19]

## **I.2. Énergie éolienne**

### **I.2.1. Définition**

Une éolienne est un appareil qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de type éolienne, laquelle est ensuite transformée en énergie électrique. La figure 6 illustre la conversion de l'énergie cinétique du vent.



**Figure 6:** Conversion de l'énergie cinétique du vent [4]

## **I.2.2. Les différents types d'éoliennes**

Il existe deux grands types d'éoliennes de nos jours, les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical [17].

On distingue plusieurs sortes d'éoliennes parmi ces deux grandes catégories.

### **I.2.2.1. Eolienne à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont souvent appelées "éolienne à hélices" et ont été inspirés des moulins à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent et sont souvent constituées de trois pales ou multiples pales pour les systèmes de pompage. Leur axe de rotation du rotor est horizontal et parallèle à la direction du vent.

Elles sont les plus utilisées sur le marché du fait que :

- ✓ Elles ont un rendement plus élevé ;
- ✓ Elles sont équipées d'un système qui permet de les orienter en fonction du vent ;
- ✓ Les frais de fonctionnement sont faibles ;
- ✓ Elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques ;
- ✓ Elles ont un coût moins important ;
- ✓ Elles sont mieux adaptées au secteur rural.

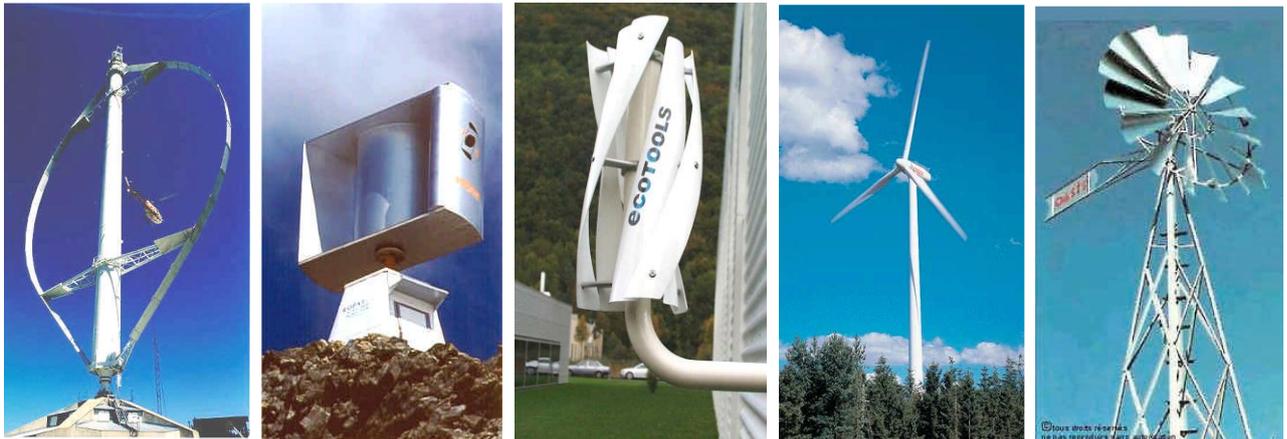
### **I.2.2.2. Eolienne à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical ont leurs axes du rotor perpendiculaire au sol. Elles n'ont pas besoins de système d'orientation, cependant leur efficacité reste médiocre par rapport aux éoliennes à axe horizontal puisqu'elles captent deux fois moins d'énergies dans le vent.

- Leur conception est plus simple que celle des éoliennes à axe horizontal ;

- L'accès est plus facile ;
- Elles ne nécessitent pas de système d'orientation par rapport à la direction du vent, ce qui constitue un avantage de construction non négligeable ;
- Lors du fonctionnement, elles ne sont pas soumises aux contraintes importantes sur les pales, les roulements et les axes dues aux changements d'orientations.

La figure 7 représente les technologies d'éoliennes.



Eoliennes à axe vertical

Eolienne à axe horizontal

**Figure 7:** Technologies d'éoliennes

### **I.2.3. Principe de fonctionnement**

Une éolienne convertit l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se déroule en plusieurs étapes :

- **La conversion de l'énergie par les pales :** Les pales tournent comme les ailes d'avion, ce qui crée une force aérodynamique du fait de la différence de pression des deux faces de la pale. Grâce à la transformation en énergie mécanique de l'énergie cinétique du vent, le rotor se met à tourner [23].
- **L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur :** Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité [23]. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leur générateur est alors beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd.
- **La production d'électricité par le générateur :** L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts [23].

- **Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur** : Cette électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20000 Volts par un transformateur [23]. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis distribuée aux consommateurs les plus proches [23].

### **I.3. Le Potentiel solaire et éolien au Sénégal**

#### **I.3.1. Le Potentiel solaire**

Le Sénégal possède l'un des meilleurs gisements solaires optimal au monde, avec une moyenne de 5,8 kWh/m<sup>2</sup>/jour au sol [20]. De quoi satisfaire des besoins énergétiques de toute la population s'il est bien exploité.

Le tableau suivant représente la répartition des gisements solaire des grandes villes du Sénégal.

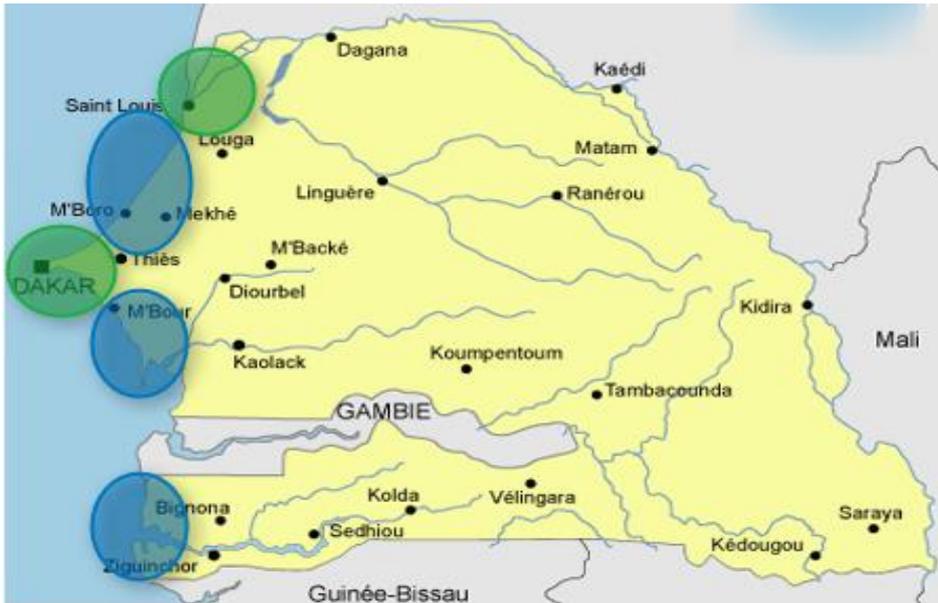
**Tableau 2:** Gisement solaire des grandes villes du Sénégal [20]

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>

#### **I.3.2. Le Potentiel éolien**

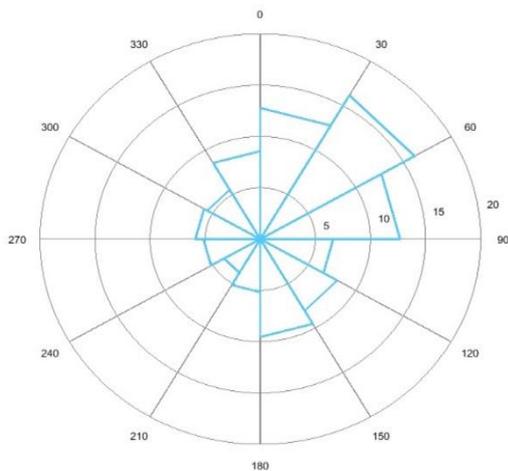
Le potentiel éolien au Sénégal est inégalement réparti. Il est concentré au niveau de la côte. Sur la carte suivante, les zones sont définies avec :

- Vert : potentiel éolien très bon à bon
- Bleu : potentiel éolien bon à moyen
- Reste de la carte : potentiel éolien faible

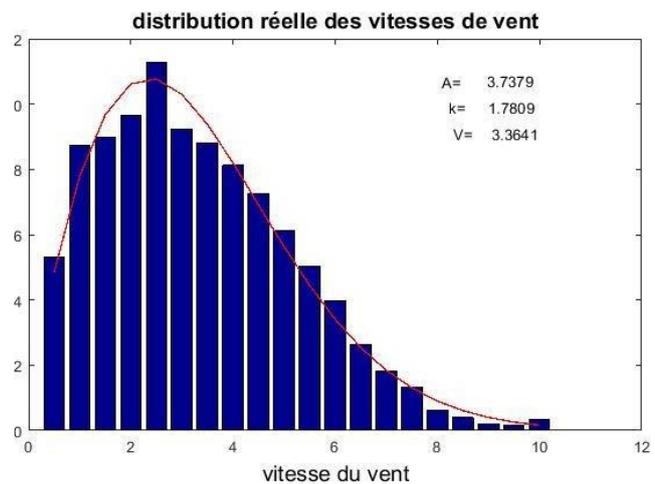


**Figure 8:** Répartition du potentiel éolien au Sénégal [21]

Plus précisément comme le montre la carte de la Figure 8, la région de Ziguinchor présente un assez bon potentiel éolien avec une vitesse moyenne de vents de  $3.37 \text{ ms}^{-1}$ , leur direction dominante est de Nord-Est d'après la rose de vents (Figure 9). Le site présente une densité de puissance de  $49 \text{ W/m}^2$ . La figure 10 représentant la distribution de Weibull permet de voir la fréquence des vitesses de vents les plus fréquents à l'université. Les données de 2015 à 2017 utilisées sont obtenues à l'aide de l'station qui se trouve aux seins de l'université. En pratique avec les caractéristiques du site et avec la distribution de Weibull on essaie de voir maintenant le type d'éolien adapté au site.



**Figure 9 :** La Rose des vents (2015-2017) à l'UASZ



**Figure 10 :** Distribution de Weibull de la vitesse des vents à l'UASZ

## **I.4. Différents types d'utilisation**

### **I.4.1. Systèmes Autonomes**

Les systèmes autonomes sont les systèmes qui utilisent uniquement des sources d'énergies renouvelables pour répondre aux besoins énergétiques. Donc c'est un système qui n'est pas connecté au réseau électrique. Il utilise des sources de stockages pour satisfaire la demande énergétique durant les heures non ensoleillées. Le système autonome permet d'être indépendant énergétiquement.

### **I.4.2. Système hybride**

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, disposant de plusieurs sources d'énergies dont l'une d'entre elles est renouvelable (Stoyanov, 2011). Donc d'un point de vue d'ensemble on peut considérer le système énergétique d'un pays comme un système hybride.

Pour classer les types de systèmes hybrides, trois (3) critères seront pris en compte :

-Le premier critère sera la présence ou non d'une source d'énergie classique. C'est-à-dire la présence d'un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière.

-Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. Ce dernier permettra de couvrir les charges pendant les périodes non couvertes par une ressource primaire. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie.

-Le dernier critère que l'on peut avoir est spécifique au type de sources d'énergies renouvelables employées. L'organisation du système peut avoir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Au moment de choisir la source à utiliser, il est important de voir d'abord la disponibilité du potentiel énergétique qui est spécifique à l'endroit où on veut implémenter le système.

Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la Figure 11.

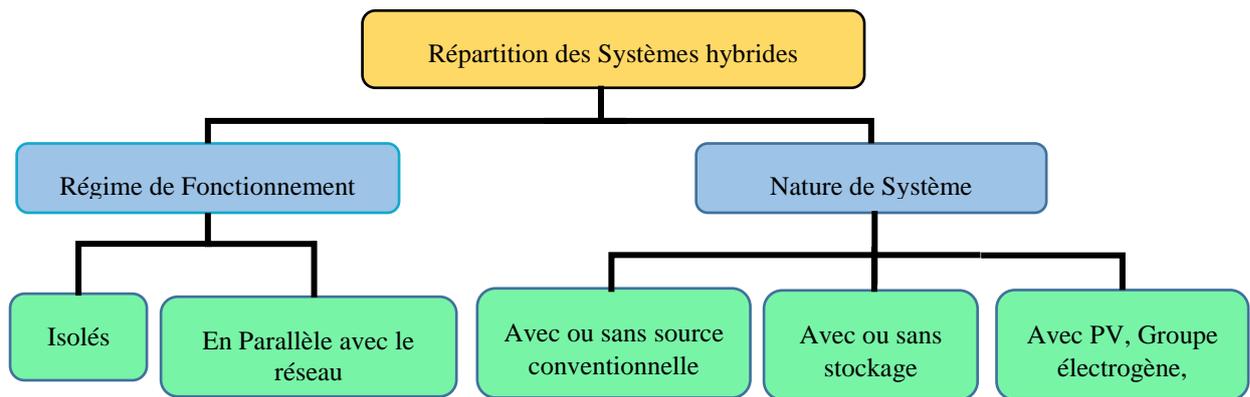


Figure 11: Répartition des systèmes hybrides

### **I.4.3. Système connecté au réseau**

Les systèmes connectés au réseau sont les systèmes raccordés au réseau public de distribution. Ils sont aujourd'hui de plus en plus adoptés pour compléter la génération des énergies conventionnelles.

Il existe principalement deux types de raccordement :

- Les systèmes d'injection totale au réseau
- Les systèmes avec injection du surplus au réseau

### **Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de faire une revue sur les systèmes de production d'énergies renouvelables : le solaire et l'éolien. Il nous a permis de voir leurs potentiels disponibles au Sénégal. Une description des différents types de systèmes d'utilisation (autonomie, connecté au réseau, hybride) a été faite. Dans la suite, une description de la méthodologie effectuée dans le mémoire sera faite.

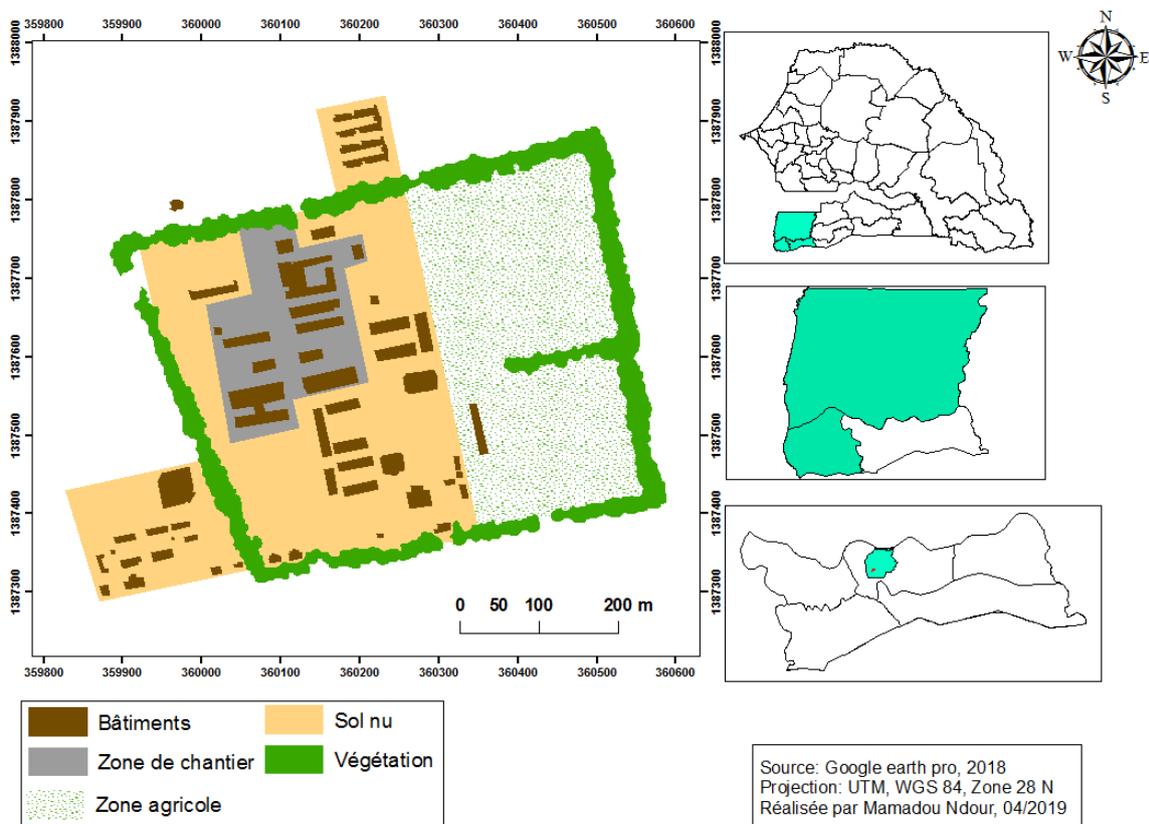
## Chapitre II : Données et Méthodes

### Introduction

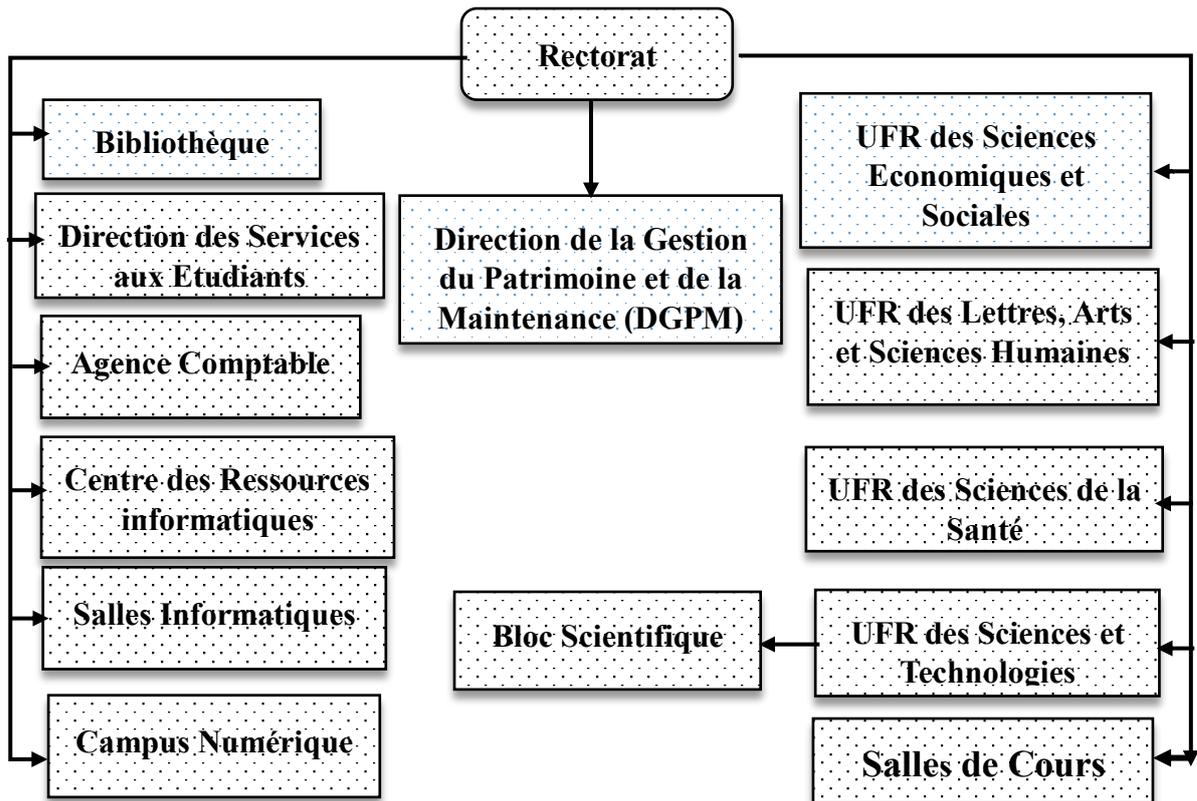
Ce chapitre est dédié aux données et à la méthodologie utilisée pour faire cette étude. En premier temps, une présentation de la zone d'étude sera faite. En second temps, les différentes étapes pour faire un bon dimensionnement seront étudiées suivie de la présentation des modèles HOMER et RESTscreen. Nous terminerons le chapitre par la présentation des données utilisées.

### II.1. Présentation architecturale de l'Université Assane Seck de Ziguinchor

L'université Assane Seck de Ziguinchor sera l'objet principal de cette étude. L'université est localisée dans la région de Ziguinchor, ses coordonnées géographiques sont 12,55° Nord et 16,27° Ouest. Dans la région, la température moyenne est de 26,9°C et la précipitation moyenne annuelle est de 1147,5 mm [23]. Elle a un climat tropical avec deux saisons (saison des pluies et saison de sèche). L'étude concerne uniquement la partie administrative et pédagogique de l'université. La figure 12 met en évidence la topologie de l'UASZ alors que la figure 13 illustre des différentes structures de l'université concernées par l'étude.



**Figure 12:** Présentation de l'université Assane Seck de Ziguinchor



**Figure 13:** Les différentes structures de l'université concernées par l'étude

## **II.2. Méthodologie**

Dans cette partie, nous allons décrire les différentes étapes de notre travail : l'identification des appareils, relevés des puissances, calcul de la puissance des différents blocs, enquêtes sur les heures de fonctionnement des équipements, calcul de la consommation énergétique journalière et le dimensionnement manuel.

### **II.2.1. Identification des appareils**

Pour procéder à l'identification et à l'inventaire de tous les appareils électriques de l'UASZ, nous avons effectué une visite dans tous les bâtiments administratifs et pédagogiques.

### **II.2.2. Relevés des puissances**

Après l'inventaire, nous avons relevé la puissance nominale de chaque appareil électrique. Ces informations se trouvent le plus souvent dans leurs plaques signalétiques.

### **II.2.3. Calcul de la puissance des différents blocs**

La puissance totale de l'ensemble de notre système a été obtenue avec la formule (1) :

$$P_t = \sum_i^n P_i \quad (1)$$

$P_t$  : puissance totale

$P_i$  : puissance de l'appareil i

#### **II.2.4. Enquête sur les heures de fonctionnement**

Une enquête sur les heures de fonctionnement des appareils électriques a été effectuée aux prés des utilisateurs afin de rendre plus rationnelle notre dimensionnement.

#### **II.2.5. Calcul de la consommation énergétique journalière**

La consommation énergétique journalière est obtenue en multipliant la puissance de l'appareil avec sa durée de fonctionnement. Comme illustré dans la formule (2).

$$E_t = \sum_i^n P_i \times t_i \quad (2)$$

$E_t$  : énergie journalière totale consommée

$t_i$  : durée de fonctionnement de l'appareil i

#### **II.2.6. Dimensionnement manuel**

##### **❖ Estimation de l'énergie journalière à produire**

L'énergie à consommer ( $E_c$ ) ne suffit pas pour dimensionner le champ PV à cause des pertes effectuées au cours du fonctionnement des panneaux solaires. L'énergie à produire ( $E_p$ ) est obtenue par la formule suivante :

$$E_p = E_c * K_1 \quad (3)$$

$K_1$  : coefficient de perte

##### **❖ Calcul de la puissance crête ( $P_c$ ) à installer,**

La puissance crête est la puissance maximale mesurée dans la condition standard de test : ensoleillement nominal de 1000 W/m<sup>2</sup> et température 25° C. Elle est obtenue avec la formule (4) suivante :

$$P_c = \frac{E_p}{I_j \times K_2} \quad (4)$$

$E_p$  : Énergie à produire

$K_2$  : Coefficient de perte = 0,6

$I_j$  : Irradiation journalière = 5,8 kWh /m<sup>2</sup>/j [19].

### ❖ Calcul du nombre de panneaux pour le champ PV

Le nombre de panneaux PV à installer soit en série ou en parallèle est obtenue respectivement par les formules suivantes :

$$N_{srie} = \frac{U_{batt}}{U_{mod}} \quad ; \quad N_{plle} = \frac{P_c}{P_{mod}} \quad (5)$$

$N_{srie}$  : nombre de panneaux en série

$N_{plle}$  : nombre de panneaux en parallèle

$U_{batt}$  : tension de la batterie

$U_{mod}$  : tension du module

$P_c$  : Puissance crête

$P_{mod}$  : puissance du module

### ❖ Calcul de la puissance réelle à installer

La puissance définitive à installer est obtenue par la formule (6)

$$P_{inst} = N_{srie} * N_{plle} * P_{mod} \quad (6)$$

$P_{inst}$  : puissance à installer

### ❖ Dimensionnement du régulateur

Pour faire un bon dimensionnement du régulateur, il nous faut connaitre la tension nominale et l'intensité maximale du PV. Ces dernières sont obtenues respectivement avec les formules (7) et (8) ci-dessous. Ensuite le nombre régulateur du système est calculé avec la formule (9)

$$I_r = 1,5 * I_m \quad (7)$$

$I_r$  = intensité du régulateur

$I_m$  = intensité (courant) maximal que délivré le champ PV

1,5 : représente les pertes engendraient par le régulateur

$$I_m = \frac{P_{inst}}{U_{syst}} \quad (8)$$

$$N_{\text{reg}} = \frac{I_r}{I_{\text{unt.reg}}} \quad (9)$$

$I_{\text{unt.reg}}$  = Courant unitaire du régulateur

$N_{\text{reg}}$  = nombre de régulateur

### ❖ Dimensionnement du stockage

La capacité du parc de batterie et le nombre de batteries qu'il faut installer sont respectivement définis dans les formules suivantes :

$$C_b = \frac{E_p * \text{Autonomie}(\text{nbre de jour})}{U_{\text{sys}} * \text{degré de décharge}(\%)} \quad (10)$$

$$N_b = \frac{C_b}{C_{\text{unit.b}}} \quad (11)$$

$C_b$  : Capacité de la batterie

$N_b$  : Nombre de batterie

$C_{\text{unit.b}}$  : Capacité unitaire de la batterie

### ❖ Dimensionnement du convertisseur

Le système produit un courant continu. L'onduleur permettra de le convertir en courant alternatif. Cependant la puissance de l'onduleur doit toujours être supérieur à la puissance pic ( $P_{\text{ond}} > P_p$ ). Le nombre d'onduleur nécessaire pour le système est obtenu avec la formule (12)

$$N_{\text{ond}} = \frac{P_{\text{ond}}}{P_{\text{unt.Ond}}} \quad (12)$$

$N_{\text{ond}}$  : nombre d'onduleur

$P_{\text{ond}}$  : puissance de l'onduleur générale

$P_{\text{unt.ond}}$  : puissance unitaire de l'onduleur secondaire

## II.2.7. Présentation des logiciels HOMER et RETScreen

Dans ce mémoire nous avons utilisé deux (2) logiciels destinés à la simulation des systèmes énergies renouvelables HOMER et RETScreen.

### II.2.7.1. HOMER

HOMER est un logiciel de simulation et d'optimisation destiné à l'étude d'installations de production d'énergie multi-sources (PV, éolien, réseau, stockage, diesel...). Un de ses plus grands avantages est de pouvoir simuler des systèmes hybrides associant différentes sources d'énergies fossiles ou renouvelables.

La première version a été développée en 1992 au NREL (US National Renewable Energy Laboratory), ensuite il a subi de nombreuses améliorations dans plus de 40 nouvelles versions. L'utilisation du logiciel n'est difficile car son interface est un peu similaire aux logiciels usuels. Dans notre étude, il est utilisé pour les systèmes hybrides son interface à trois zones importantes (Figure 14) :

- La zone 1 permet de définir le système c'est à dire de sélectionner les différents composants du système utiliser
- La zone 2 est la zone des ressources, elle permet de rentrer les informations des sources utilisées
- La zone 3 est la zone d'affichage de résultats après simulation

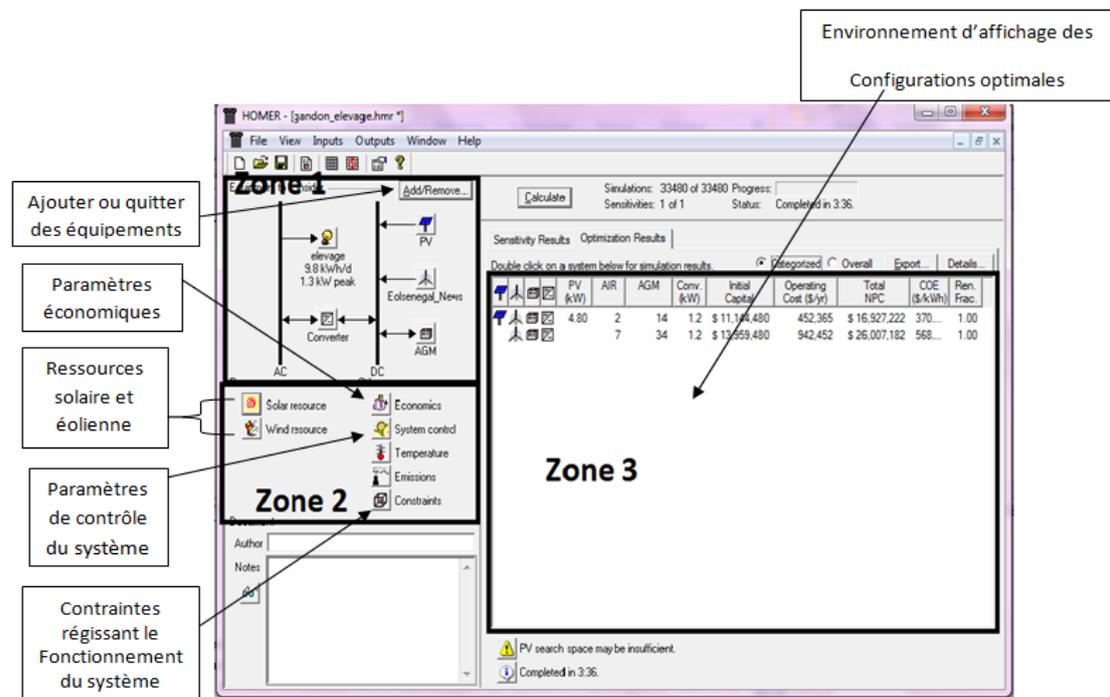


Figure 14: Interface principale de HOMER

## II.2.7.2. RETScreen

RETScreen, basé sur Excel, est aussi un logiciel de simulation pour une gestion d'énergies propres affecté à l'analyse de faisabilité de projets d'efficacité énergétique. Il permet en plus d'obtenir le retour sur investissement, le flux monétaire et d'optimiser la surface disponible. Il est utilisé pour l'étude des systèmes PV seul. RETScreen International est supporté par CanmetENERGIE et Ressources naturelles Canada. Il est très populaire et est utilisé dans plus de 220 pays. RETScreen possède trois (3) applications de base : raccordé au réseau, hors réseau et le système de pompage de l'eau.

Pour que les solutions proposées par le logiciel soit acceptable, il est impérative de faire une analyse de certains de ses paramètres :

- La valeur actualisée nette (VAN) qui est un indicateur financier, elle représente le gain d'argent engendré durant la vie du projet. Le projet est rentable si la VAN est positive.
- Le Taux de rendement interne (TRI) qui est un indicateur, elle permet de mesurer la justesse d'un projet

La fenêtre d'accueil de RETScreen est bien illustrée dans la figure 15 ainsi que ses fonctionnalités.

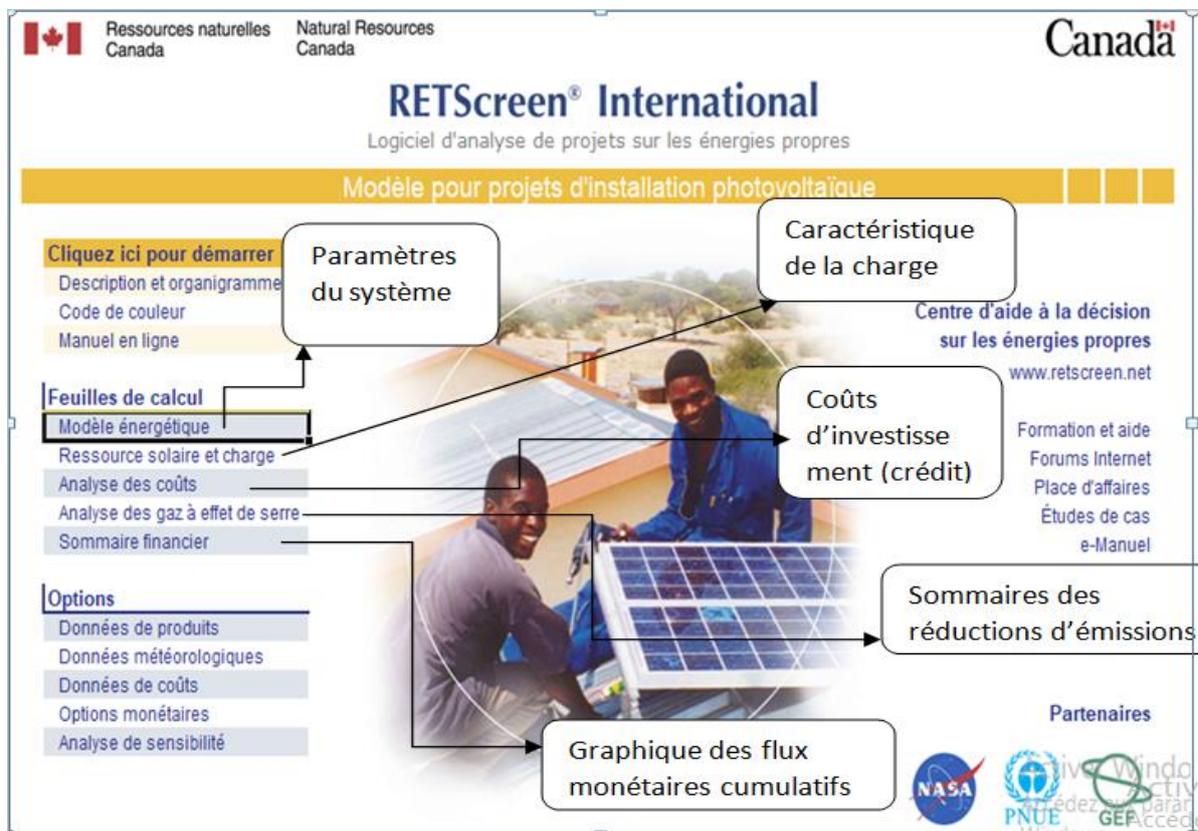


Figure 15: Fenêtre d'accueil de RETScreen

## **II.3. Présentation des Données :**

### **II. 3.1. Bilan de Puissance**

Le bilan de puissance est un pas essentiel dans le dimensionnement d'une installation électrique. Il prend en compte la puissance de pointe de la structure c'est-à-dire la puissance totale lorsque tous les appareils fonctionnent en même temps.

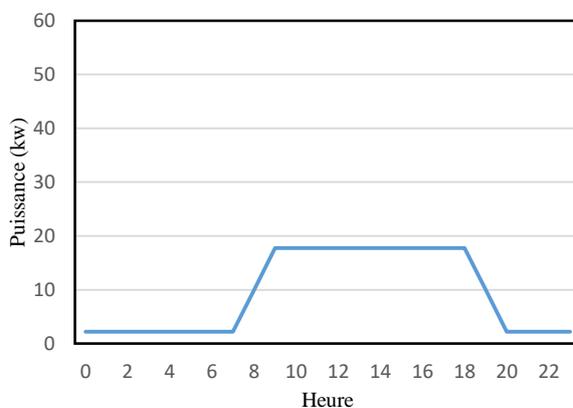
Pour plus de précision, on pouvait utiliser le facteur de simultanéité (**Ks**) pour déterminer les conditions d'utilisation de l'installation qui s'appliquent à l'ensemble des récepteurs ou circuits des bâtiments de l'université. En outre, nous pouvions aussi utiliser le facteur d'utilisation (**Ku**) pour déterminer le taux d'utilisation de chaque récepteur selon le temps. Parce que, par expérience, il y'a une faible probabilité que toute les charges de l'installation fonctionnent simultanément. Cependant, dans notre dimensionnement il ne sera pas nécessaire d'utiliser le **Ks** et le **Ku** car les étudiants ou le personnel amènent toujours un surplus de charge à l'université donc pour ne pas subir ce genre de surprises, la pointe de puissance utilisée sera un peu plus surdimensionnée.

#### **II.3.1.1. Profil de charge journalière de L'UASZ**

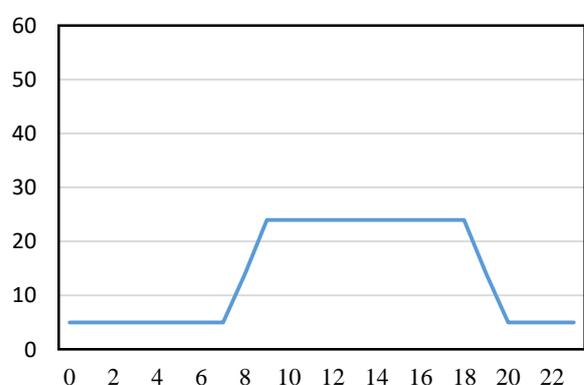
##### **II.3.1.1.1. Profil de charge du Bloc Scientifique**

Le bloc scientifique est un bâtiment composé essentiellement de quatre laboratoires ; physique, chimie, géographie et Agroforesterie. Les laboratoires de physique et de chimie sont répartis chacun dans deux salles respectivement BS01, BSO3 et BS02, BSO4.

Chaque laboratoire dispose de différents équipements électriques (climatiseur, lampe, frigos, imprimante, chauffe-eau, ordinateur, fontaine et matériels de travaux pratiques). Ainsi, leurs profils de charges sont représentés de la figure 16 à la figure 19.



**Figure 16 :** Profil de charge de laboratoire physique



**Figure 17 :** Profil de charge de laboratoire chimie

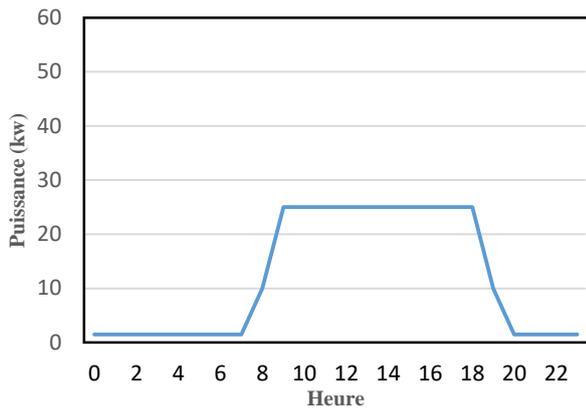


Figure 18 : Profil de charge de laboratoire de géographie

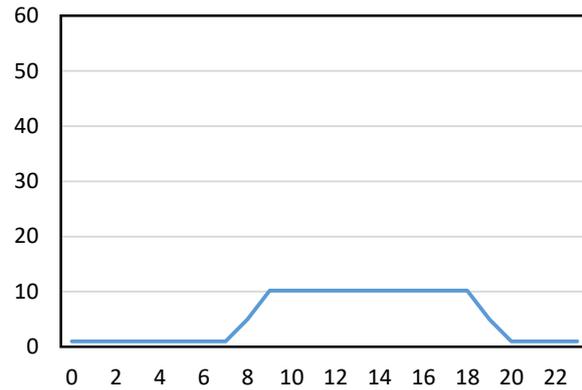


Figure 19 : Profil de charge de Laboratoire d' Agroforesterie

### II.3.1.1.2. Profil de charge des Bâtiments UFR

Les Unités de Formation de Recherche (UFR) à l'Université Assane Seck de Ziguinchor sont aux nombres de quatre (4) : UFR des Sciences Economies et Sociales ; UFR des Sciences et Technologies ; UFR des Lettres, Arts et Sciences Humaines et l'UFR des Sciences de la Santé. Ainsi leurs profils de charges sont représentés de la figure 20 à la figure 23.

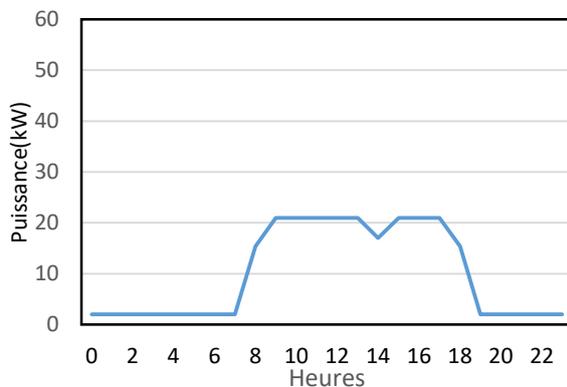


Figure 20 : Profil de charge de l'UFR des Sciences Economies et Sociales

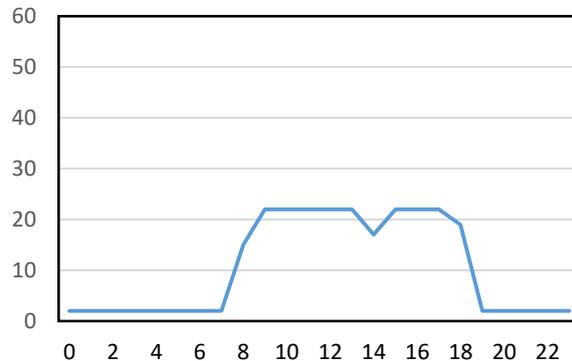


Figure 21 : Profil de charge de l'UFR des Sciences et Technologies

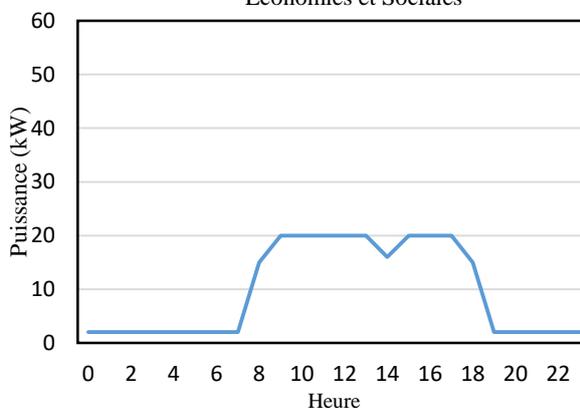


Figure 22 : Profil de charge de l'UFR des Sciences Economies et Sociales

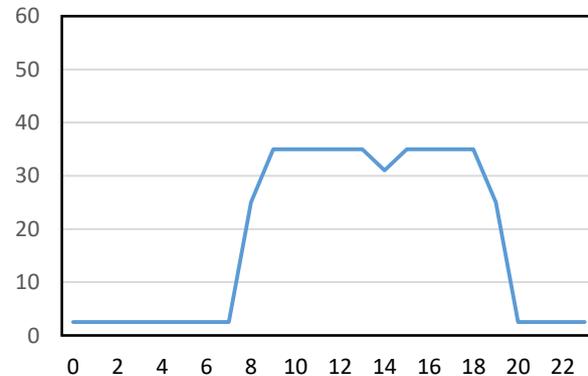


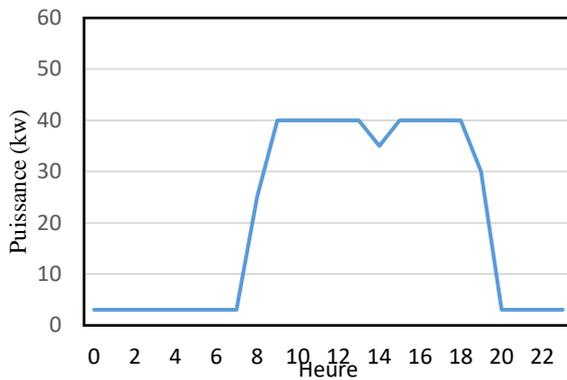
Figure 23 : Profil de charge de l'UFR des Sciences de la Santé

Avec les profils de charges, la puissance commence à évoluer à 07h30min pour atteindre un pic à 09h. Ce pic est maintenu jusqu'à 18h constitué à la descente. En effet, il est remarqué également une chute de 13h à 15h qui marque l'heure de pause dans les différentes structures.

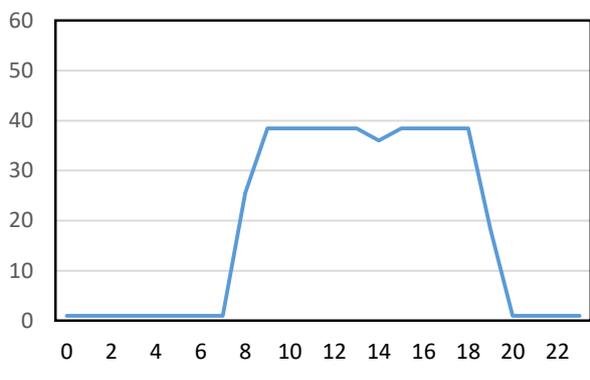
Cependant, il faut remarquer que la demande est plus élevée pour l'UFR des Sciences de la Santé ; ceci s'explique par le fait qu'il y a plus de bureaux, plus de charges électriques.

### **II.3.1.1.3. Profil de charge des autres structure de l'UASZ**

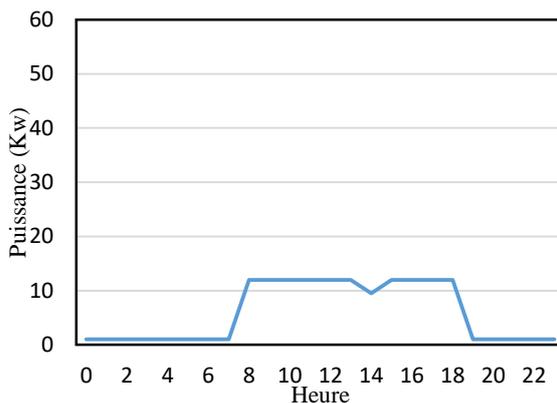
Les autres structures sont le rectorat, la bibliothèque, l'agence comptable, la direction de la gestion du patrimoine et de la maintenance, le centre des ressources informatiques, les salles de cours, les salles informatiques et le campus numérique. Leurs profils de charges sont respectivement illustrés sur les figures 24 à 31.



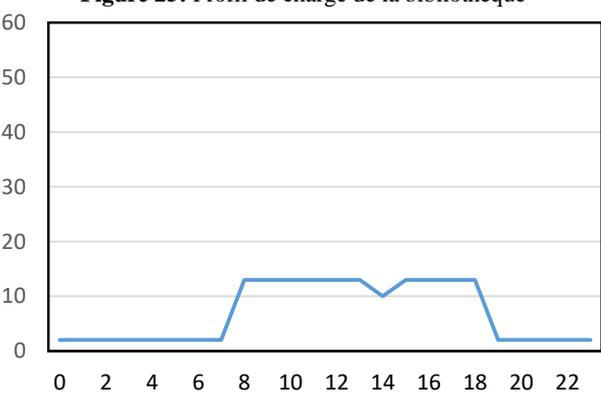
**Figure 24 :** Profil de Charge du Rectorat



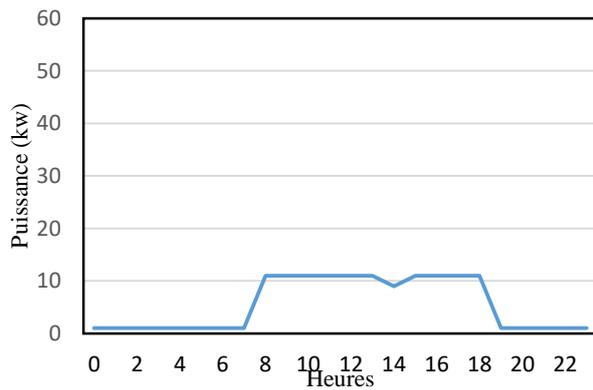
**Figure 25:** Profil de charge de la bibliothèque



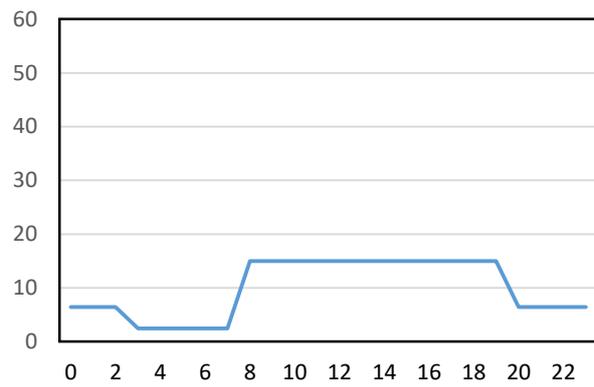
**Figure 26:** Profil de charge de l'Agence Comptable



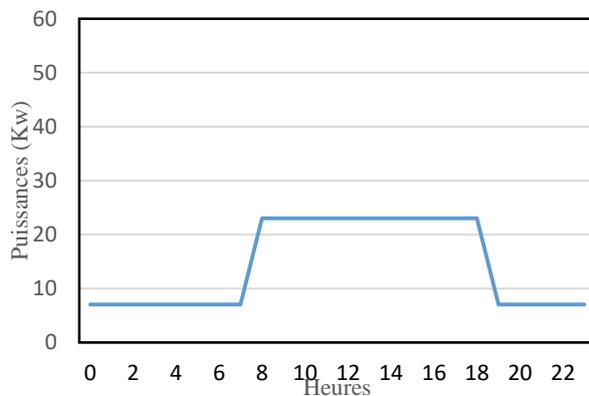
**Figure 27:** Profil de charge de la Direction de la Gestion du Patrimoine et de la Maintenance (DGPM)



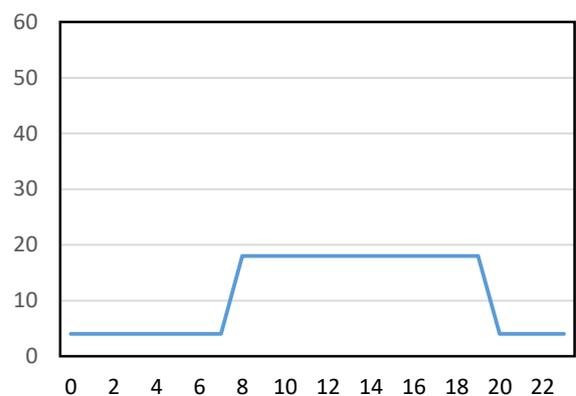
**Figure 28:** Profil de charge du Centre des ressources Informatiques



**Figure 29 :** Profil de charge des Salles de Cours



**Figure 30 :** Profil de charge des salles Informatiques



**Figure 31 :** Profil de charge du Campus Numérique

Les figures ci-dessus représentent le profil de charge des différents bâtiments de l'UASZ. Elles montrent l'utilisation des appareils électriques (les appels de puissances) en fonction des heures de la journée. Les pics de puissance apparaissent durant les heures de travail, de 8h à 18h avec une pause de 2h à partir de 13h marquée par une baisse de charge. Ils varient d'un bâtiment à un autre, d'une structure à une autre à cause de la différence de charges électriques et de leurs utilisations.

En effet, la même évolution des profils est constatée, une augmentation de la demande pendant les heures de travail, durant les jours ouvrables, suivie d'une diminution considérable le reste des heures à cause des appareils qui restent allumés toute la journée.

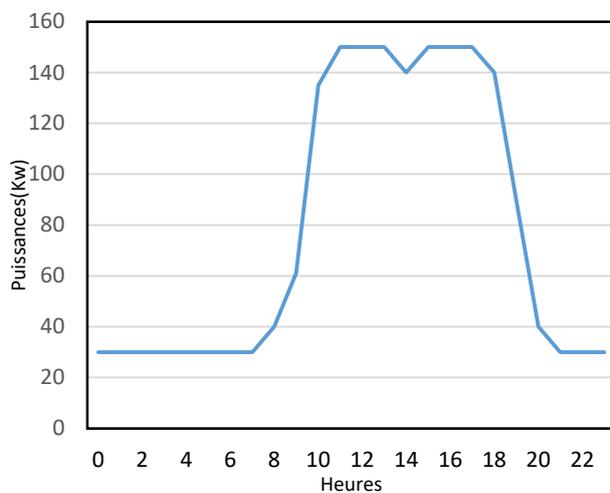
#### **II.3.1.1.4. Profil de charge de l'Université Assane Seck de Ziguinchor**

La figure 32 montre le profil de charge globale de l'université obtenu à partir des profils des différentes structures. Comme les autres profils, il commence à augmenter à partir de 07h30min

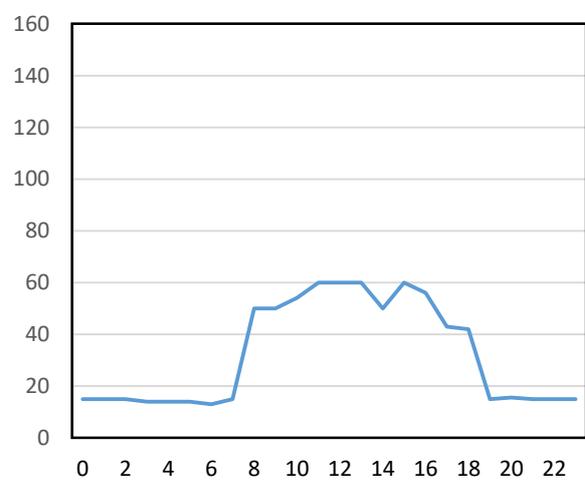
pour atteindre son pic au tour de 150 kW jusqu'à 18h. Sauf qu'entre 13h-15h, une baisse de charge est remarquée marquant l'heure de pause.

Nous avons également tracé le profil de charge à partir de la SENELEC (figure 33) mais pendant la période de vacances. Les évolutions sont quasi à peu près les mêmes mais sauf que celui obtenu avec la SENELEC est environ trois (3) fois plus faible à cause des vacances.

En effet, on ne peut avoir les mêmes pics de puissances car le but de ce rapport ce n'est de gérer la simultanéité. Néanmoins les deux figures montrent les mêmes évolutions c'est-à-dire les pics sont obtenus pendant les heures de travaux.



**Figure 16:** Profil de l'Université Assane Seck de Ziguinchor obtenu par dimensionnement



**Figure 17:** Profil de charge de l'université obtenu par le Réseau SENELEC en période de vacance

Le pic de puissance obtenu lors du dimensionnement est :

$$P_p = 150 \text{ kW}$$

Alors que celui obtenu avec le réseau SENELEC pendant la période de vacance est :

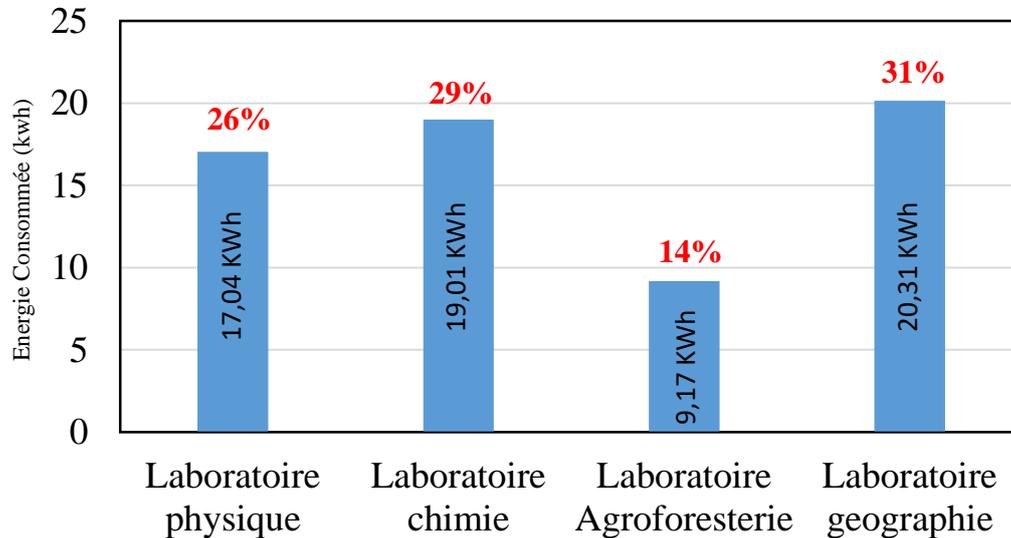
$$P_p = 60 \text{ kW}$$

### **II.3.1.2. Bilan de la consommation Énergétique journalière**

Le bilan énergétique permet de déterminer la consommation énergétique des différentes structures de l'université.

### **II.3.1.2.1. Bilan énergétique journalier du bloc Scientifique**

La Figure 34 montre la répartition de la consommation énergétique journalière entre les différents laboratoires par rapport à la consommation du Bloc Scientifique.



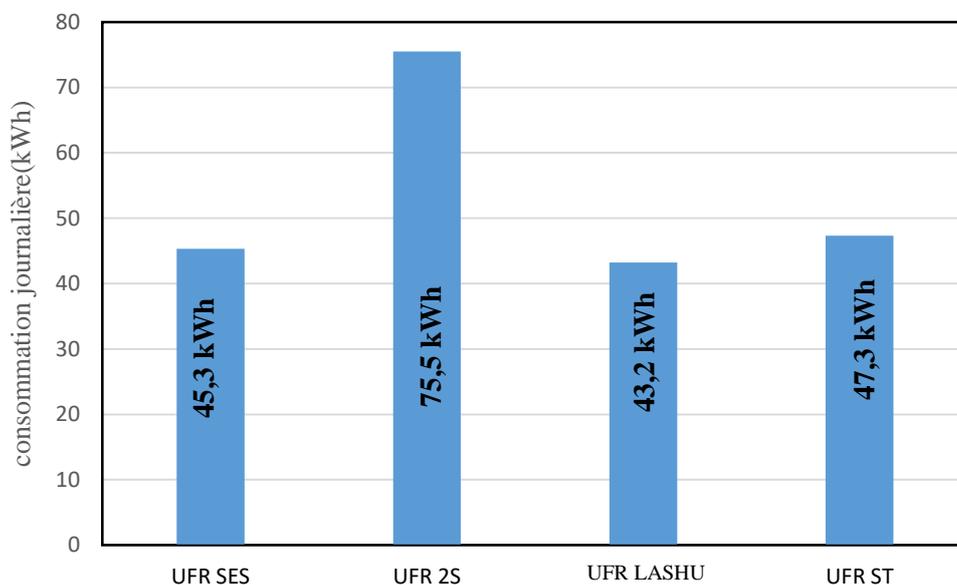
**Figure 18** : Consommation et répartition Energétique journalière du Bloc Scientifique

On note sur la figure que le labo géographie occupe la plus grande partie dans la consommation du bloc avec 31%. En effet cela s'explique par le nombre de climatiseurs, 4 de 5275 W chacun, enregistré dans le labo. Alors que les autres labos partagent un climatiseur pour trois (3) bureaux.

Le labo de chimie représente 29% devant le labo physique qui est de 26%. En effet les travaux pratiques en chimie utilisent beaucoup plus d'équipement à grande consommation.

### **II.3.1.2.2. Bilan énergétique journalier des UFR**

Dans cette partie, nous présentons le bilan énergétique des différents UFR. La figure 35 montre les différentes consommations énergétiques journalières de chaque UFR. Elle permet de faire un classement sur le niveau de consommation des UFR. Il convient de souligner que l'UFR des Sciences de la Santé (UFR 2S) consomme le plus avec 75,5 kWh par jour. Cette consommation élevée est due au fait que l'UFR 2S est composée de 2 grands bâtiments et comporte beaucoup plus d'équipements électriques. Il faut ajouter qu'aussi ces bâtiments constituent en même temps les salles de cours ainsi que les salles de travaux pratiques. L'UFR des lettres, des arts et science humaines (UFR LASHU) à la plus petite consommatrice avec 43,2 kWh par jour.



**Figure 19:** Consommation Energétique journalière des UFR

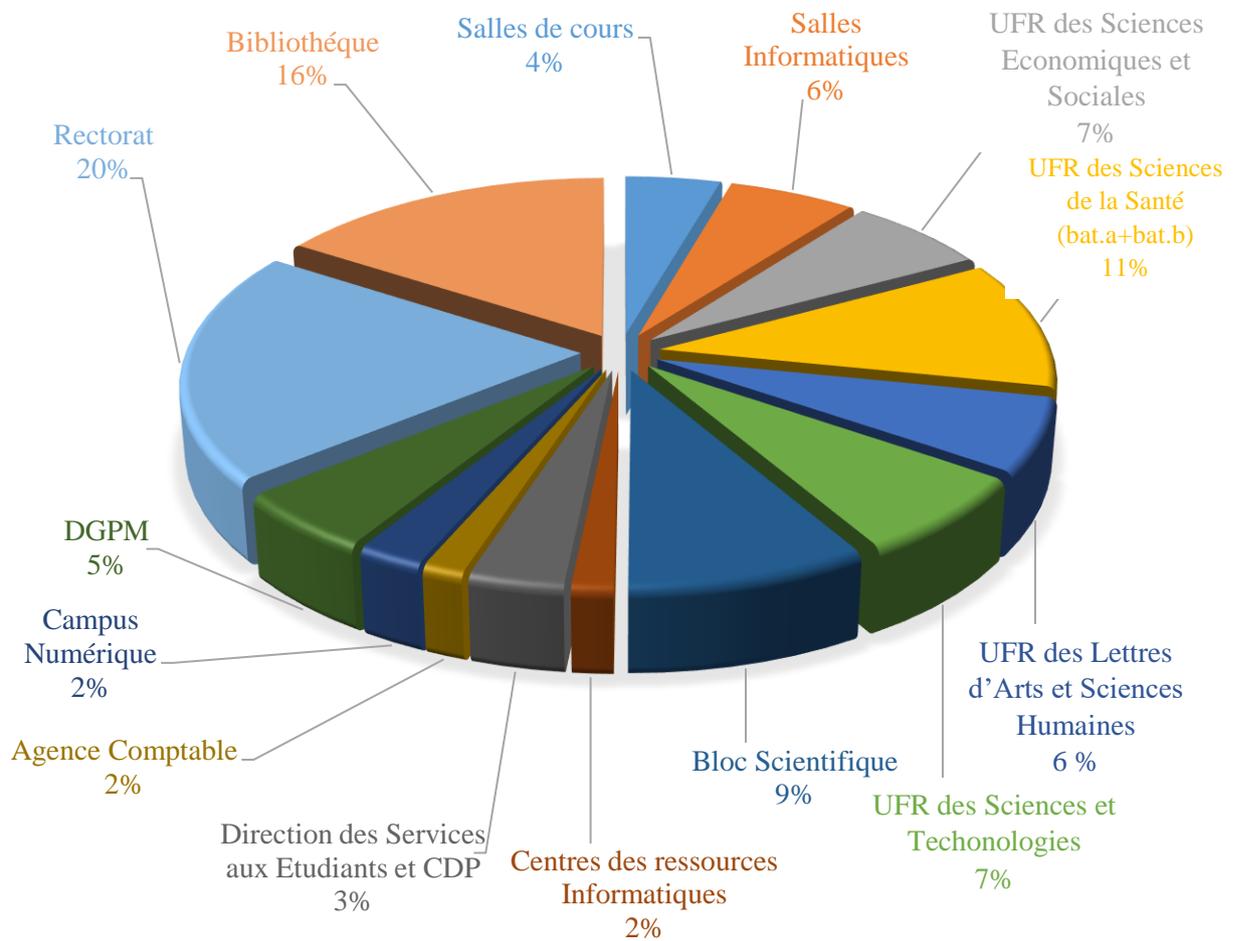
### **II.3.1.2.3. Bilan énergétique journalier de l'UASZ**

La figure 36 montre la répartition de la consommation énergétique journalière des différentes structures de l'université Assane Seck de Ziguinchor. Elle permet de voir comment l'énergie est consommée à l'université. Cette répartition montre que le rectorat et la bibliothèque sont respectivement les plus grands consommateurs avec 20 % et 16 % de l'énergie journalière totale de l'université. En effet, le bâtiment du rectorat regorge un nombre important de cabinets fonctionnant durant toute l'année avec son arsenal d'équipement électrique. C'est le fonctionnement de tous ces appareils électroniques qui expliquent entre autres les raisons de cette surconsommation énergétique de la part du rectorat. Par ailleurs, la bibliothèque quant à elle, occupe la seconde place sur le plan de la consommation non seulement à cause de ces appareils électroniques mais également à cause de la fréquentation des étudiants dans la structure accompagnés de leurs outils informatiques.

En outre, la consommation de l'UFR de la santé et du bloc scientifique sont non négligeables, car ils enregistrent respectivement un pourcentage de 11 % et 9 % de consommation énergétique dépassant de loin le reste des structures. Le centre des ressources informatiques, l'agence

comptable et le campus numérique sont des structures de l'université qui enregistrent une consommation de 2 % plus ou moins modérées.

Le tableau 3 fait une synthèse du bilan de puissance et du bilan énergétique de l'UASZ.



**Figure 20:** répartition de la consommation énergétique journalière des différentes structures de l'université Assane Seck de Ziguinchor

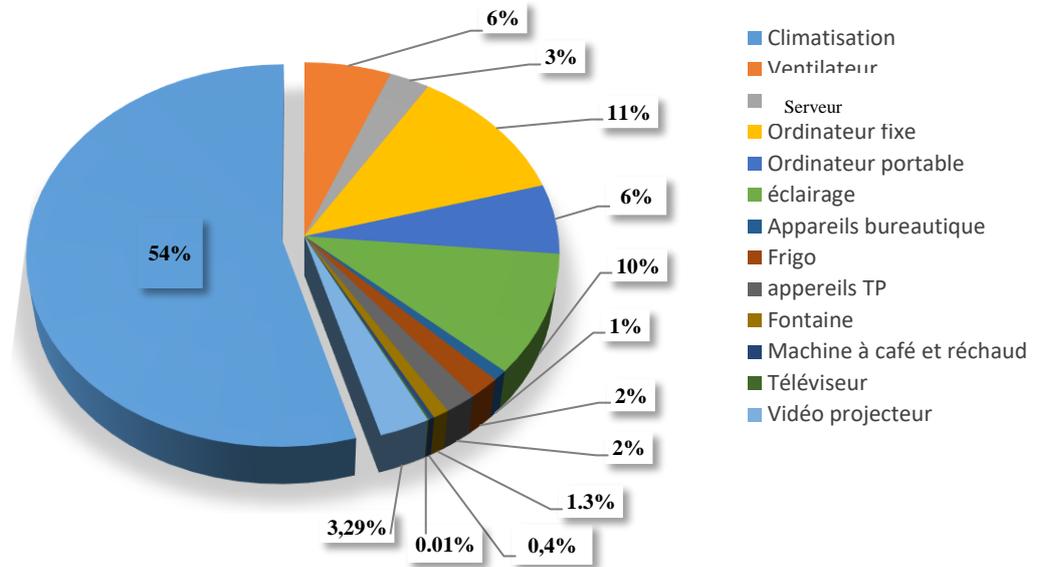
**Tableau 3:** Tableau de synthèse du bilan de puissance et du bilan énergétique de l'UASZ.

Bâtiments	Puissances Estimées (kW)	Puissances Estimées Mensuelle (kW)	Energies Consommées Journalière (kWh)	Energies Consommées Mensuelle (kWh)
Rectorat	25,713	642,825	165,248	3257,97
Direction de la Gestion du Patrimoine et de la Maintenance (D.G.P.M.)	6,361	159,025	35,957	934,882
Bibliothèque	20,305	507,625	145,832	2753,14
Agence Comptable	5,831	145,775	10,232	266,03
UFR lettres Arts et Sciences Humaine	6,902	172,55	43,228	1123,928
UFR des Sciences et Technologies	9,912	172,55	47,3	1229,8
UFR des Science Economiques et Sociales	6,961	174,025	45,385	1180,01
UFR des Sciences de la Santé (Bat,A+Bat,B)	12,876	321,9	75,584	1965,184
Direction des Services aux Etudiants et CDP	4,876	121,9	10,232	266,03
Bloc Scientifique	19,338	483,45	65,534	1703,884
Salles de Cours	33,421	868,946	30,14	783,64
Centre des Ressources Informatiques	5,749	143,725	12,712	330,512
Salles Informatiques	13,829	345,725	40,185	1044,81
Campus Numérique	5,215	130,375	16	416

La consommation énergétique journalière ( $E_c$ ) de l'université est de 743,57 kWh soit une consommation moyenne mensuelle de 17,25 MWh.

#### **II.4. Répartition de la consommation énergétique par équipement**

Une répartition de la consommation énergétique des appareils de l'université est représentée dans la figure 37. En effet, les climatiseurs sont les plus grands consommateurs, avec 54% de la consommation totale. La consommation effectuée par les ordinateurs fixes et par l'éclairage ne sont pas négligeables, ils représentent respectivement 11% et 10%. Les appareils bureautiques composés de scanner, de photocopieuses, d'imprimantes, téléphones fixe et de broyeuses consomment représente 1% de la consommation totale.



**Figure 21:** Répartition de la consommation énergétique des différents équipements de l'UASZ

## Conclusion

Ce chapitre présente la méthodologie et les données utilisées dans ce mémoire. Les données météorologiques sont obtenues à partir de la base de données de la NASA. Le bilan de puissance des différentes structures a été étudié mais également la répartition de la consommation en fonction des structures d'une part et en fonction des équipements d'autre part. Dans la suite, nous allons faire une présentation des solutions proposées ensuite le dimensionnement de ces solutions pour déterminer la taille de leurs différents composants.

# Chapitre III: Etude technique : dimensionnement des solutions

## Introduction

Dans le chapitre III, nous allons faire un dimensionnement appliqué à l'université Assane Seck de Ziguinchor. Une description détaillée de chaque type de systèmes proposés sera effectuée. Ainsi, la taille des différents composants des solutions sera déterminée.

### III.1. Dimensionnement des solutions proposées

La figure 38 résume les différentes solutions proposées dans ce mémoire.

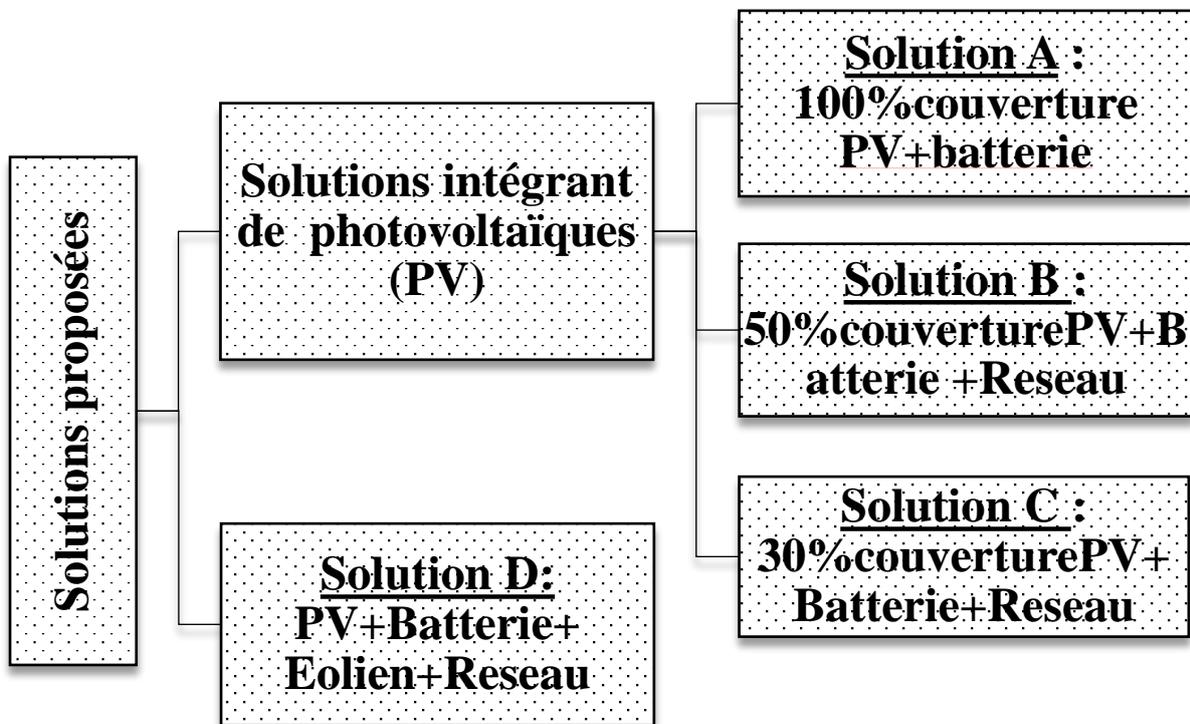
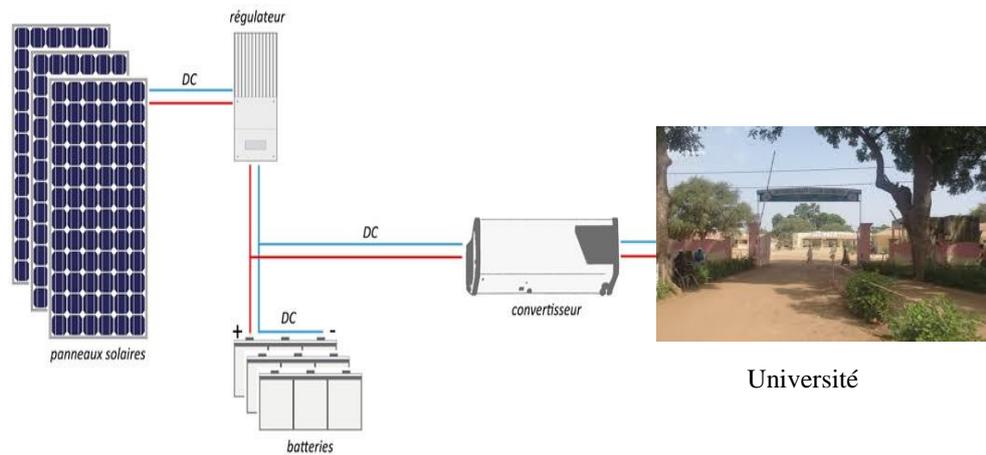


Figure 22: Schéma des solutions proposées

### **III.1.1. Solution A**

La solution A est un système PV + batteries uniquement. Illustrée dans la figure 39, elle est dimensionnée pour couvrir totalement la charge de l'université. Les éléments nécessaires pour un tel système sont étudiés dans la suite.



**Figure 23:** Représentation du système : PV + batterie [22].

#### **❖ Principe de fonctionnement**

Le générateur PV fournit de l'électricité à l'université et charge les batteries à l'aide du contrôleur de charge (le régulateur). La consommation de l'énergie issue des PV et des batteries est rendue possible grâce à l'onduleur qui transforme le courant continu issu des PV et des batteries en courant alternatif utilisable par les charges de l'UASZ.

#### **III.1.1.1. Dimensionnement du champ PV**

La puissance crête nécessaire pour couvrir totalement les charges de l'UASZ est de 347 kWc. Ainsi le champ PV doit comporter 1388 modules de 250Wc chacun soit une surface de 2331,84 m<sup>2</sup>.

Le champ PV, ayant une production moyenne journalière de 1,276 MWh/jour soit une production annuelle de 696,621 MWh/an peut couvrir les besoins énergétiques journaliers (0,74 MWh/jour) et annuels (696,421 MWh/an). Le système produit ainsi un excédent d'énergie annuelle de 0,2 MWh/an. L'excédent peut être utilisé en cas de nouveaux besoins.

La figure 40 montre la répartition de la puissance moyenne mensuelle du PV durant l'année. Une faible production est notée en Juin, Juillet, Août et septembre correspondant à la saison des pluies. Une faible production est également constatée en Décembre et Janvier où la couverture nuageuse est importante.

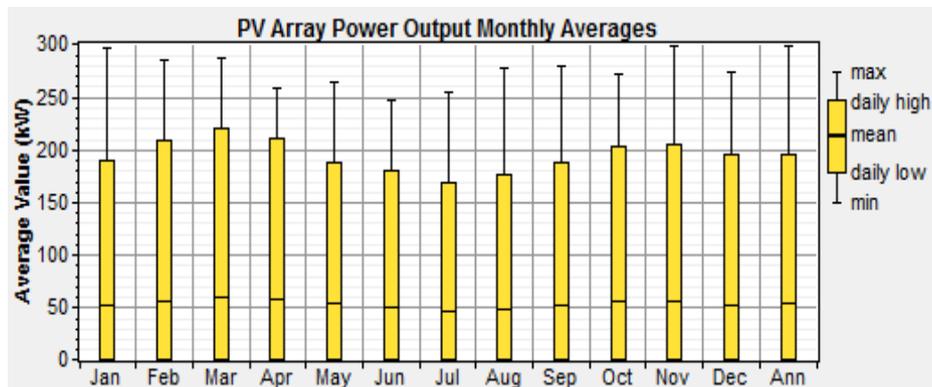


Figure 24: Moyenne mensuelle de la puissance du champ PV

### III.1.1.2. Dimensionnement du régulateur et de l'onduleur

Le système aura besoin de 240 régulateurs (60 A/24V) qui seront mise en parallèle et de 112 onduleurs 2 kW qui seront également branchés en parallèle.

### III.1.1.3. Dimensionnement du stockage (batteries)

Dans notre zone d'étude, le gisement solaire est abondant (4,86 KWh/m<sup>2</sup>/jour) par conséquent une autonomie de deux (2) jours suffit pour une couverture totale de la charge. Ainsi, 800 batteries 200 Ah seront nécessaires.

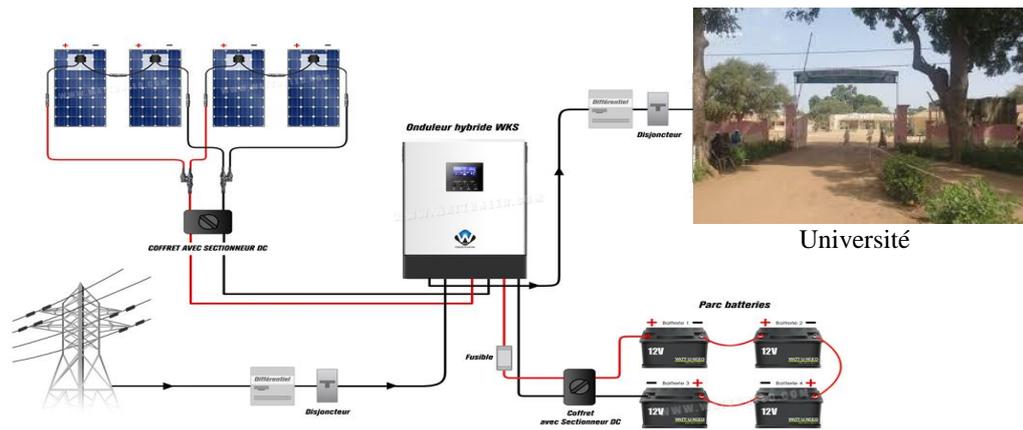
En résumé, ce système nécessite une surface très grande pour le champ PV et une grande capacité de stockage. Cependant, l'avantage est qu'il permet d'être autonome à 100%.

### III.1.2. Solution B :

La solution B est un système PV + batteries. Contrairement à la solution A, elle est dimensionnée pour couvrir 50% de la charge de l'université. Le déficit sera couvert par le réseau SENELEC. Les éléments nécessaires pour un tel système sont étudiés dans la suite.

#### III.1.2.1. Description du système

La figure 41 illustre la description du système utilisé dans la solution proposée. Cette même configuration sera utilisée pour la solution C, seulement le taux de couverture du PV sera modifier.



**Figure 25:** Représentation du système : PV + batterie + Réseau [22]

Avec ce type de configuration, le système dispose d'un onduleur hybride qui joue à la fois le rôle de régulateur et d'onduleur. Il est associé aux batteries, travaille en parallèle avec le réseau public d'électricité.

Durant la journée, la production du champ PV est directement consommée par les charges. Cette consommation directe est rendue possible grâce à l'onduleur qui convertit le courant continu issu de PV en courant alternatif utilisable par les charges AC. Si toutefois, les charges ne sont pas couvertes, le réseau intervient en appoint pour combler le manque. En cas de délestage, pendant une période non ensoleillée, l'onduleur isole l'installation et auto-alimente le secteur en attendant la couverture du réseau.

### **III.1.2.2. Dimensionnement des composants du système**

Dans cette partie, le logiciel RETScreen a été utilisé pour faire ce travail. Il nous permettra de dimensionner et d'optimiser le système.

#### **III.1.2.2.1. Dimensionnement du champ PV**

La puissance crête nécessaire pour couvrir à 50% les charges de l'UASZ est de 270 kW<sub>c</sub>. Ainsi le champ PV doit comporter 1080 modules de 250W<sub>c</sub> soit une surface de 1814,4 m<sup>2</sup>.

Le champ PV a une production moyenne journalière de 0,81 MWh/jour soit une production annuelle de 348,07 MWh/an.

#### **III.1.2.2.2. Dimensionnement de l'onduleur**

Le système aura besoin de 50 onduleurs hybrides de 4 kW chacun. Comme la puissance maximale ne change pas, on gardera le même dimensionnement de l'onduleur pour les solutions restantes.

### **III.1.2.2.3. Dimensionnement du stockage**

Pour assurer la couverture de manière permanente, une autonomie de deux (2) jours suffit. Ainsi, 48 batteries de 200 Ah seront nécessaires pour les besoins du système.

### **III.1.2.2.4. Dimensionnement du réseau**

Rappelons que le système n'est pas autonome. Il couvre 50% des besoins énergétique de l'UASZ. Les autres 50% sont couverts par le réseau électrique avec une puissance de 76 kW soit 371,8 kWh en moyenne journalière et 348,63 MWh/an en moyenne annuelle.

En résumé, le réseau ne couvre que 50% des besoins énergétiques de l'UASZ. Il est intéressant du point de vue technique, économique et environnemental. Il implique moins de batteries et moins de surface pour le champ PV par rapport à la solution A.

### **III.1.3. Solution C :**

La solution C'est un système PV + batteries. Elle couvre 30% de la charge de l'université. Le déficit sera couvert par le réseau SENELEC. Les éléments nécessaires pour définir un tel système sont étudiés dans la suite.

#### **III.1.3.1. Dimensionnement du champ PV**

La puissance crête nécessaire pour couvrir à 30% les charges de l'UASZ est de 160 kW<sub>C</sub>. Ainsi le champ PV doit comporter 640 modules de 250W<sub>c</sub> chacun soit une surface de 1664 m<sup>2</sup>.

Le champ PV a une production moyenne journalière de 0,48 MWh/jour soit une production annuelle de 262,72 MWh/an.

#### **III.1.3.2. Dimensionnement du stockage**

Pour satisfaire les besoins du système, 28 batteries de 200 Ah seront utilisées. Les batteries auront une autonomie de deux (2) jours pour couvrir totalement la charge.

#### **III.1.3.3. Dimensionnement du réseau**

Le système n'est pas autonome. Il couvre 30% des besoins énergétique de l'UASZ. Les autres 70% sont couvert par le réseau électrique avec une puissance de 100 kW soit 223,07 kWh en moyenne journalière et 491,37 MWh/an en moyenne annuelle.

En résumé, cette solution est intéressante sur le plan technique et économique. Cependant, le potentiel solaire disponible n'est pas totalement exploité ce qui n'est pas intéressant du point de vue environnemental par rapport aux autres solutions.

### **III.1.4. Solution D**

La solution D est un système PV + batteries + éolienne+ réseau. Elle couvre 52% de la charge de l'université dont 50% assuré par le PV + batterie et 2% par l'éolienne. Le reste sera couvert par le réseau SENELEC. Les éléments nécessaires pour un tel système sont étudiés dans la suite.

#### **III.1.4.1. Description du système**

Dans cette partie, le logiciel HOMER a été utilisé pour faire ce travail. Comme nous l'avons montré en II.2.7.1, il va permettre de dimensionner et d'optimiser en même temps notre système hybride. Le système est composé d'un champ PV, des batteries, de l'éolien. Il est connecté au réseau comme le montre la figure 42.

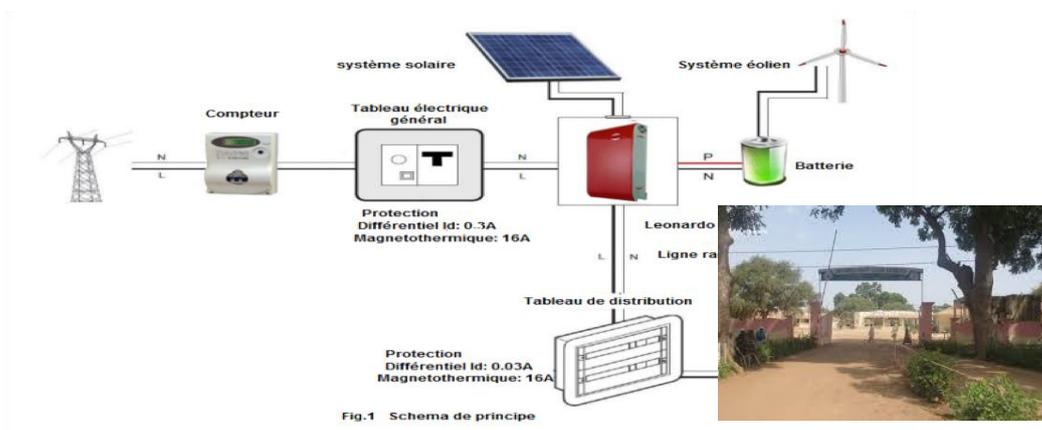


Figure 26: Représentation du système utilisé pour la solution D [22].

#### **III.1.4.2. Dimensionnement du champ PV**

La puissance crête nécessaire pour couvrir totalement les charges de l'UASZ est de 258 kWc. Le champ PV doit ainsi comporter 1032 modules de 250Wc chacun soit une surface de 1733,76 m<sup>2</sup>. Le champ PV a une production moyenne journalière de 0,949 MWh/jour soit une production annuelle de 346,4 MWh/an.

#### **III.1.4.3. Dimensionnement du stockage**

Dans notre zone d'étude, le gisement solaire est abondant (4,86 KWh/m<sup>2</sup>/jour) par conséquent une autonomie de deux (2) jours suffit. Ainsi, 42 batteries de 200 Ah satisferont les besoins du système.

#### **III.1.4.4. Dimensionnement de l'éolienne**

Le choix de l'éolien adéquat est basé sur les caractéristiques du site, par exemple la vitesse et la direction des vents dominants. Après l'étude sur la distribution de Weibull dans le premier chapitre, une éolienne dont la vitesse de démarrage est inférieure ou égal à 2,5 m/s serait adapté à notre site.

Pour répondre au besoin énergétique, 4 éoliennes de type Eolsenegal seront utilisés. L'éolienne a une vitesse de 2,5 m/s avec une puissance nominale 500 W à 7 m/s. De ce fait, le champ éolien produit une puissance de 2,5 kW en moyenne journalière et 10,76 kWh/an en moyenne annuelle.

#### **III.1.4.5. Dimensionnement du réseau**

Le réseau couvre 48% du besoin énergétique journalier de l'université électrique avec une puissance de 53 kW soit 152,96 KWh en moyenne journalière et 331,57 MWh/an en moyenne annuelle.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, une étude technique de tous les paramètres et des quatre systèmes proposés a été effectuée. Pour la solution avec éolien, une alternative peut s'offrir une fois l'expansion de l'université et que les obstacles aux alentours du site auront diminué ; le nombre de petites éoliennes pourra être augmentées. Les systèmes auront besoins des éléments de protections nécessaires pour leurs bons fonctionnements comme : les disjoncteurs, les fusibles et les protections contre la foudre. Ils doivent être protégés aussi de toutes choses pouvant altérer leurs productions d'énergies. Dans la suite une étude économique et environnementale de ces solutions sera faite.

## **Chapitre IV : Etude Economique et Environnementale**

### **Introduction**

Ce chapitre est consacré à l'étude économique et environnementale des solutions proposées. D'abord, nous allons procéder à une étude économique c'est-à-dire, estimer les coûts d'investissements, étudier la variabilité et rentabilité financière de chaque solution. Ensuite, faire une étude d'impact environnemental où nous ferons un bilan carbone des différentes solutions. Enfin, pour terminer le chapitre une synthèse des solutions sera effectuée.

#### **IV.1. Etude Economique**

##### **IV.1.1 Solution A :**

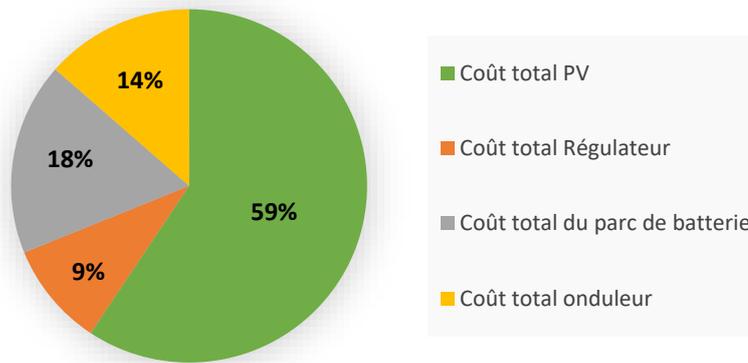
###### **IV.1.1.1. Estimation des coûts**

La solution A à couverture totale par le champ PV, nécessite un coût d'investissement de **725 453 130** FCFA (tableau 4) et des coûts supplémentaires de câblage, de l'armoire à coffret et autres de 500 000 FCFA. Ainsi, on se retrouve avec un coût total de **725 953 130** FCFA. Le coût élevé de ce système est dû en partie au champ PV et au parc de batterie représentant respectivement 59% et 18% du coût de l'investissement total (figure 43).

**Tableau 4:** Coûts d'investissement de la solution A

<b>Composants</b>	<b>Capital (FCFA)</b>	<b>Remplacement (FCFA)</b>	<b>Maintenance et autres (FCFA)</b>	<b>Récupération (FCFA)</b>	<b>Total (FCFA)</b>
<b>Champ PV</b>	448 669 460	0	1 795 710	0	450 465 170
<b>Batterie</b>	106 339 200	105 000 000	700 000	50 795 800	133 737 960
<b>Régulateur</b>	40 000 000	20 000 000	250 000	8 000 000	72 250 000
<b>Onduleur</b>	60 790 000	25 478 460	854 500	14 279 238	102 767 064
<b>Système</b>	655 798 660	150 478 460	3 600 210	73 075 038	<b>725 453 130</b>

La figure 43 montre la répartition des coûts en fonction des différentes parties du système. Le champ PV occupe plus de la moitié du coût d'investissement avec 59 % ensuite, le parc batteries avec 18%. Dans ce système, le régulateur a le plus faible coût d'investissement avec 9% du coût total.



**Figure 27:** La répartition des coûts d'investissements de la solution A

#### **IV.1.1.2. Variabilité et rentabilité financière**

Le taux de rendement interne (TRI) du projet est égal à 12,7%. Ce TRI permet d'annuler le flux financier autrement dit, d'avoir un retour sur investissement au bout de 9,1 ans. À compter de cette date, l'énergie générée par le système sera « gratuite » et le projet engendrera une économie annuelle de 18 089 450 FCFA pour l'UASZ. En effet, toutes les sommes qui ont été mobilisées sous forme de prêt et autres seront remboursées au bout de 9,1 ans. Ainsi, le système fonctionnera 15,9 ans ou l'énergie sera gratuite. La valeur actualisée nette VAN positive de 168 039 550 FCFA qui représente le gain d'argent engendré durant les 25 ans montre encore que le projet est viable.

#### **IV.1.2. Solution B**

##### **IV.1.2.1. Estimation des coûts**

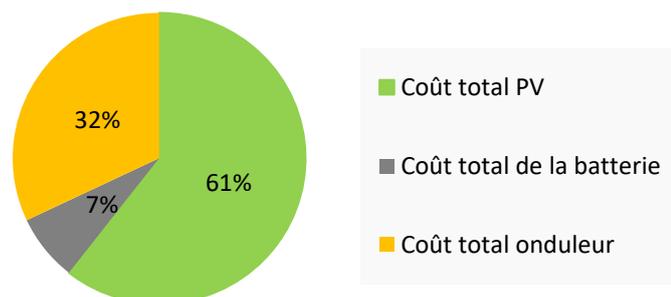
La solution B correspondant à 50% de couverture du champ PV, nécessite un coût d'investissement de 396 966 188 FCFA (tableau 6) et des coûts supplémentaires de câblage, de l'armoire à coffret et autres, soit un coût total de 397 466 188 FCFA. Avec ce système du parc de batterie qui a considérablement diminué, représentant 7% du coût de l'investissement (investissement, entretien et autres). Les panneaux ne sont pas remplacés durant tout le projet.

Les batteries seront remplacées deux (2) fois (n°10 et n°20) et aussi le convertisseur (n°15), avec une récupération respective de 1795 800 FCFA et 14 279 238 FCFA.

**Tableau 5:** Coûts d'investissements de la solution B

Composants	Capital (FCFA)	Remplacement (FCFA)	Maintenance et autres (FCFA)	Récupération (FCFA)	Total (FCFA)
<b>Champ PV</b>	152 070 804	0	42 329 196	0	194 400 000
<b>Batterie</b>	8 809 056	8 000 000	150 000	1 795 800	23 816 688
<b>Convertisseur</b>	81 713 280	25 478 460	8 854 562	14 279 238	102 767 064
<b>Systeme</b>	260 879 860	36 648 774	57 816 876	16 075 476	<b>396 966 188</b>

La répartition des coûts d'investissement de la solution B en fonction des différentes parties du système est illustrée dans la figure 44. Le coût d'investissement du champ PV occupe encore la plus grande partie avec 61% mais par contre celui du parc de batterie a considérablement diminué (7%). En effet, avec un raccordement au réseau le système stocke moins d'énergie. Les coûts d'onduleurs ont augmenté (35%) parce que dans l'injection au réseau sa nécessite des onduleurs de grandes puissances et beaucoup plus sophistiqués.



**Figure 28:** La répartition des coûts d'investissements de la solution B

#### **IV.1.2.2. Variabilité et rentabilité financière**

Le taux de rendement interne (TRI) du projet est égal à 16.1%. Ce TRI permet d'annuler le flux financier autrement dit, d'avoir un retour sur investissement au bout de 2,1 ans. À compter de cette date, l'énergie générée par le système sera « gratuite » et le projet engendrera une

économie annuelle de 12 299 300 FCFA pour l’UASZ. La durée de vie de l’installation étant 25 ans, donc avec un retour sur investissement de 2,1ans, on peut dire que le projet est rentable. La valeur actualisée nette VAN positive de 139 396 500 FCFA qui représente le gain d’argent engendré durant les 25 ans montre encore que le projet est viable.

### **IV.1.3. Solution C :**

#### **IV.1.3.1. Estimation des coûts**

A 30% de couverture PV, La solution C nécessite un coût d’investissement de 228 384 048 FCFA (tableau 6) et des coûts supplémentaires : du câblage, de l’armoire à coffré et autres soit un coût total de 228 884 048 FCFA. Avec ce système du parc de batterie considérablement diminué, représentant 7% (Figure 45) du coût de l’investissement (investissement, entretien et autres).

**Tableau 6:** Coûts d’investissements de la solution C

<b>Composants</b>	<b>Capital (FCFA)</b>	<b>Replacemen t (FCFA)</b>	<b>Maintenance et autres (FCFA)</b>	<b>Récupératio n (FCFA)</b>	<b>Total (FCFA)</b>
<b>Champ PV</b>	194 401 920	0	25 083 822	0	219 485 742
<b>Batterie</b>	4 404 528	4 000 000	2 816 778	897 900	11 908 344
<b>Convertisseur</b>	44 570 880	13 897 302	5 375 136	7 780 516	56 054 802
<b>Système</b>	243 377 328	19 482 678	33 275 736	8 686 854	<b>228 384 048</b>

#### **IV.1.3.2. Variabilité et rentabilité financière**

Avec la solution C où le système est configuré de telle sorte que le champ PV couvre 30% de la production totale de l’UASZ, le taux de rentabilité interne est de 28,4%. Il nous permet d’annuler le flux financier au bout de 1,7 ans. Au-delà de cette date, l’énergie sera « gratuite » et le système générera à partir de ce moment une économie annuelle de 15 800 000 FCFA. Comparé à la durée de vie de l’installation qui est de 25 ans au temps de retour sur investissement donc le projet est rentable. La valeur actualisée nette(VAN) positive de 75 650 800 FCFA qui représente le gain d’argent engendré sur sa durée de vie, nous permet de renchérir que le projet est viable.

## **IV.1.4. Solution D**

### **IV.1.4.1. Estimation des coûts**

Quant à la solution D, elle nécessite un coût d'investissement de **420 790 662 FCFA** (tableau 7) et des coûts supplémentaires : du câblage, de l'armoire à coffré et autres soit un coût total de **421 290 662 FCFA**.

**Tableau 7:** Coûts d'investissements de la solution D

<b>Composants</b>	<b>Capital (FCFA)</b>	<b>Remplacement (FCFA)</b>	<b>Maintenance et Autres (FCFA)</b>	<b>Récupération (FCFA)</b>	<b>Total (FCFA)</b>
<b>Champ PV</b>	185 760 000	0	30 447 986	0	151 970 886
<b>Eolien</b>	18 250 000	18 250 000	21 448 030	313 744	28 584 050
<b>Batterie</b>	11 564 400	8 418 314	300 000	1 795 800	23 816 688
<b>Onduleur</b>	87 768 000	20 846 172	8 062 704	11 683 212	110 381 600
<b>Système</b>	303 202 486	43 536 700	60 258 720	13 792 756	<b>420 790 662</b>

### **IV.1.4.2. Variabilité et rentabilité financière**

Le système générera à partir du temps de retour sur investissement une économie annuelle de 11 580 000 FCFA. Le coût actuel net (CNP) positive de 140 170 000 FCFA représentant le gain d'argent engendré sur la durée de vie du projet.

## **IV.2. Etude d'impact Environnemental**

Dans ce contexte de changement climatique et de limitation du réchauffement global à moins de 2°C (Accord de Paris sur le changement climatique du 12 décembre 2015) [24]. L'utilisation des énergies renouvelables a connu un développement fulgurant presque dans tous les continents ces dernières années. Néanmoins les projets d'énergies renouvelables doivent répondre aux critères de faisabilité, de rentabilité économique et, le plus important, de réduire au plus les émissions de GES.

### **IV.2.1. Bilan Carbone**

Le Bilan Carbone est un outil développé par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Énergie). Il est utilisé dans le volet environnement, le bilan carbone permet d'avoir les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre selon une méthode dont les règles sont publiques et officiellement reconnues [24].

Le résultat est obtenu grâce à une confrontation de calculs et d'observations. Les chiffres permettant de convertir les données observables en émissions de gaz à effet de serre, exprimées en équivalent carbone, sont appelés des "facteurs d'émissions". Pour établir ces facteurs d'émissions, les cycles de vie des matériaux et des fluides sont étudiés.

#### **❖ Méthodologie :**

Pour calculer le contenu en équivalent carbone d'un kWh électrique fourni et consommé par l'université, il a été pris en compte les émissions dues :

- à l'énergie primaire utilisée pour faire 1 kWh à la sortie de la centrale ;
- à la fabrication de l'appareil de production (panneau solaire);

Ainsi la formule (13) permet de calculer les émissions de GES [25].

$$\text{Emission (kg.éq.C)} = \text{EEC (kWh)} \times \text{FEE (kg.éq.C/kWh)} \quad (13)$$

EEC : Energie électrique consommée (KWh)

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

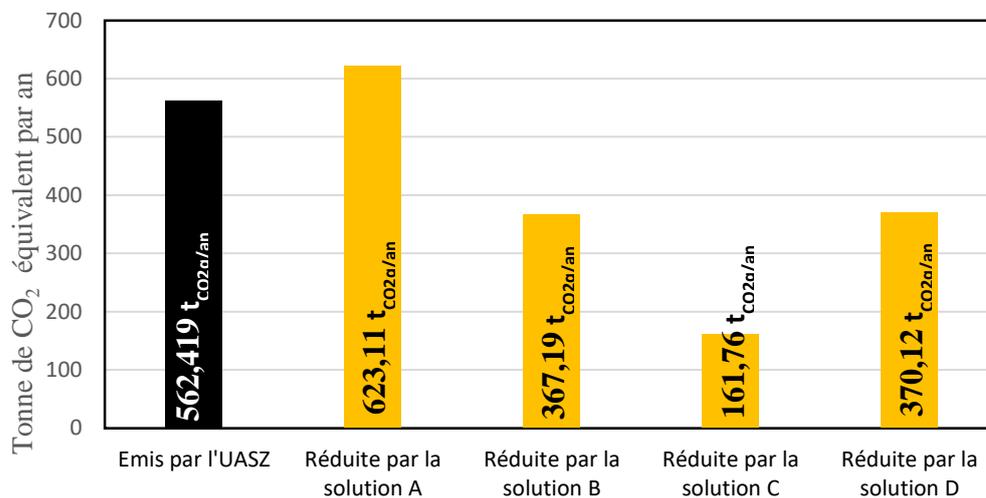
Le facteur d'émission électrique est obtenu par la relation (14)

$$FEE = \frac{\text{Emission annuelle}}{\text{Production annuelle d'énergie}} \quad (14)$$

Le facteur d'émission est évalué au Sénégal à 0,741 kg.éq.C/KWh dans la littérature. Pour avoir la quantité émise en CO<sub>2</sub>, il suffit de faire : 12 g de carbone représente 44 g de CO<sub>2</sub>.

## IV.2.2. Bilan carbone des solutions proposées

La figure 45 illustre le bilan carbone de l'université et des solutions proposées. L'UASZ émet en moyenne dans l'environnement 562,419 tCO<sub>2</sub>q/an (calculer à partir de la formule 13). Ce qui représente une valeur ajoutée chaque année à la pollution atmosphérique. La solution A où la couverture PV est totale, permet de réduire totalement les émissions avec 623.11 tCO<sub>2</sub>q/an. Les autres solutions B, C et D réduisent en temps partiel les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi les solutions purement renouvelables, contribuent à la protection de l'environnement. Si au Sénégal, la consommation d'un kWh d'origine fossiles libère 0,741 kg équivalent carbone dans la nature, au bout de la durée du projet (25 ans) les émissions réduites auront des retombées économique importante pour l'université avec les mécanismes de développement propre (MDP).



**Figure 29:** gaz à effet de serre émis et à éviter

## IV.3. Synthèse

Le tableau 8 présente une synthèse des résultats obtenus sur le plan financier, le retour sur investissement, la taille des champs PV et la réduction des émissions de GES. Il peut permettre également de voir une relation entre l'impact environnemental et le coût d'investissement. En effet, plus la solution impacte positivement l'environnement, plus elle est chère.

Ce tableau permet aussi de voir que lorsque le coût financier est élevé, la solution prend plus de temps pour son retour sur investissement (9,1 ans pour la solution A). Il est noté aussi une dépendance entre la réduction des émissions de GES et la surface occupée par le champ PV et l'éolien. Plus la surface occupée est importante plus la solution permet de réduire les émissions de GES.

En termes d'investissement, le système a 50% de couverture PV + batterie est plus rentable car, son coût financier et sa valeur actualisée nette c'est-à-dire le gain d'argent engendré durant les 25 ans comparé aux autres solutions proposées constitue un meilleur investissement. Cependant, sur le plan environnemental, la solution A, constitue la meilleure alternative, car elle permet de réduire totalement les émissions de GES de l'UASZ. Ceci est contraire aux études menées par C. Mouhamed en 2013 dans les zones du Sakhor, Gandon et Potou où il juge que les systèmes PV + éolienne + batterie sont plus intéressants sur le plan économique et environnemental par rapport au système PV + batterie [12]. En effet, cette différence pourrait être due au gisement solaire et éolien intéressant dans ces zones.

**Tableau 8:** Tableau de Synthèse

<b>Solutions Proposées</b>	<b>Solution A</b>	<b>Solution B</b>	<b>Solution C</b>	<b>Solution D</b>
<b>Coût Financiers (FCFA)</b>	725 453 130	397 466 188	228 884 048	421 290 662
<b>Valeur actualisée nette (VAN)</b>	168 039 550	139 396 500	75 650 800	140 170 000
<b>Réduction de GES (tco2q/an)</b>	623,11	367,19	161,76	378,12
<b>Surface Occupées (m<sup>2</sup>)</b>	2333,84	1814,4	1664	1944,9
<b>Retour sur investissement (ans)</b>	9,1	2,1	1,7	

## **Conclusion**

Dans cette dernière partie, nous avons pu voir tous les paramètres économiques et environnementaux des systèmes. Leurs inconvénients et leurs avantages ont été dégagés afin de voir qui est plus adéquat pour le site. Le choix le plus convenable s'est porté sur le système connecté au réseau sur le plan économique. Sur le plan environnemental la solution A est la plus intéressante.

## **Conclusion générale**

C'est dans le principe de faire une étude technico-économique et de l'impact environnemental que ce travail a été établi. Il est consacré à la mise en place de solutions d'énergies renouvelables (solaire photovoltaïque et/ou éolien) pour la production d'électricité à l'université Assane Seck de Ziguinchor. Compte tenu de la forte demande énergétique et de la facture énergétique élevée de l'université, l'intégration de systèmes d'énergies renouvelables autonomes ou connectés au réseau serait une alternative pour alléger la facture énergétique d'une part. Ces systèmes contribueront, d'autre part, à préserver l'environnement des émissions des gaz à effet de serre d'origine fossile (SENELEC).

Pour ce faire, une description des systèmes autonomes (PV +batterie) et des systèmes hybride (PV+Batterie+Réseau et PV+Batterie+Eolien+Réseau) a été effectuée. Ainsi nous avons effectué une étude technique, économique et environnementale des différentes solutions proposées. Cette étude a été sous différentes combinaisons de systèmes avec les outils HOMER et RETScreen en situation hors réseau (Off Grid) et connectée au réseau (On Grid) sur une période de 25 ans. Les profils de charge utilisés dans ce travail ont été établis à partir du bilan de puissance. Celui-ci a montré que le pic de puissance de l'université est de 150 kW et que la consommation moyenne journalière est de 743,57 kWh. Les résultats obtenus sont analysés du point de vue économique et environnemental.

Sur le plan économique, les résultats ont montré que le coût d'investissement pour la réalisation de la solution PV autonome est très élevé. Elle présente aussi un temps de retour sur investissement élevé (plus de 9 ans). Par contre, les systèmes intégrés au réseau (PV+ batterie +réseau, PV+batterie+Eolien+réseau) sont les meilleurs sur le plan économique car ils présentent les coûts d'investissement et les temps de retour sur investissement les plus faibles (moins de 3 ans).

Sur plan environnemental, les résultats montrent que la solution autonome purement renouvelable est la meilleure. Elle permet de réduire 623,11 tonnes de CO<sub>2</sub> contre 562,419 tonnes par an émises par l'UASZ pour une consommation purement fossile.

Enfin, il est important de souligner le volet efficacité énergétique, qui doit être absolument pris en compte avec les solutions de sources énergies renouvelables, si possible d'utiliser des appareils électriques, qui consomment moins d'énergies possibles ou d'effectuer de manière fréquente la maintenance de ces appareils. Il est nécessaire aussi de faire une audite énergétique pour permettre le suivi de la consommation de l'université.

En perspectives, nous proposons de travailler sur des profils réels élaborés sur une plus longue période de mesure. En outre, il serait intéressant d'augmenter le nombre de solutions voire même implanter l'une des solutions déjà proposées.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [3] B.O. BILAL, « Mise en œuvre de nouvelles approches d'optimisation multi-objectif de systèmes hybrides éolien-solaire-batterie-groupe électrogène », Thèse de Doctorat de L'Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar, Sénégal, 2017, pp 154
- [4] M. ADDOU et A. BEDDIAF, « Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour l'alimentation d'une ferme », Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de Master, 2016, 138 p.
- [5] B. AMIN, « Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie » Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de Master Professionnel, 2015, pp 65
- [6] HASSINI née BELGHITRI HOUDA, «modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque», université Abou-bakr belkaid de Tlemcen, 2010, 106 p.
- [7] BENSEFIA et S. MAMOUN, « Dimensionnement d'une installation photovoltaïque d'une Maison Autonome Appliquée au Site de Tlemcen », Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme Licence LMD en Physique Energétique, Université de Tlemcen, Juillet 2008, 82 p.
- [8] PERACOD, « le guide des acteurs privés et publics des énergies renouvelables au Sénégal », 2011.
- [9] K. Brono and Nathalie, « Evaluation des émissions carbone du siège de la commission de l'union économique et monétaire ouest africaine (UEMOA) », 2011
- [10] B. Ould Bilal et al, «Multi-objective design of PV-wind-batteries hybride systems by minimizing the annualized cost system the lost of power supply probability (LPSP) », 2013, DOI: 10.1109 / ICIT.2013.6505784, 861-867
- [11] L.Stoyanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelable », 2011, 87 p
- [12] 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 », 2013,
- [13] B. FLECHE, D. DELAGNES, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007, 103 p.
- [14] Energie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.

## Site internet

- [1] <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/tend/sen/fr/eg.use.elec.kh.pc.html>, (10/11/2018)
- [2] <http://www.SIE-Sénégal2010.gouv.sn> (12/11/2018)
- [15] [http://enrj.renouvelables.free.fr/energie\\_solaire\\_photovoltaique.html](http://enrj.renouvelables.free.fr/energie_solaire_photovoltaique.html)
- [16] <http://www.simple-et-solaire.com/victron/184-onduleur-solaire-victron-phoenix-800va.html> (22/11/2018)
- [17] <http://www.lepanneausolaire.net/images/batterie-solaire-au-plomb.jpg>
- [18] <https://www.masolise.com/regulateur-solaire-mppt-100-30-c2x23909592> (15/10/2018)
- [19] <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696> (10/01/2019)
- [20] <https://www.wattneed.com/fr/content/44-protection-d-une-installation-electrique-wks> (9/12/2018)
- [21] <http://www.senegal-energies.com/sources-d-energies/energies-renouvelables/eolien/53-potentiel-eolien> (22/11/2018)
- [22] <http://www.saloumenergie.com/index.php/kit-leonardo/> (22/11/2018)
- [23] [https://planificateur.acontresens.net/afrique/senegal/basse\\_casamance/ziguinchor/2243940.html](https://planificateur.acontresens.net/afrique/senegal/basse_casamance/ziguinchor/2243940.html) (11/12/2018)
- [24] <https://e-rse.net/definitions/definition-bilan-carbone/#gs.299bas> (02/02/2019)
- [25] <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/climate-change/timeline/> (14/03/2019)
- [26] <https://www.mendeley.com/viewer/?fileId=1eb25350-0434-24d5-3ddd-a5a95210d7d2&documentId=722dee77-f6a3-3706-91ee-f1c5c742b363> (10/11/2018)

## Annexe 1 : Bilan énergétique

Carnet de Dimensionnement pour une solution d'Energie Renouvelable destinée à l'université Assane Seck de Ziguinchor				
Bilan énergétique				
Charges	Nbres	Puissance (W)	Heures /jour	Consommations
Ordinateur fixe	150	150	h =	Wh
Ordinateur portable	320	65	h =	Wh
Climatiseur1	90	2637	h =	Wh
Climatiseur2	20	5275		
Lampe1	425	36	h =	Wh
Lampe2	30	100	h =	Wh
ventilateurs	200	55	h =	Wh
Imprimante	60	575	h =	Wh
Photocopieuse	20	440	h	
Vidéo projecteur	50	445	h =	Wh
Fontaine	6	645	h =	Wh
Machine à Café	22	1000	h =	Wh
Chauffe Eaux	10	2000	h	
Frigo bar	28	86	h	
Téléviseur LED	2	35	h	
Matériels TP physique			h	
Matériels TP chimique			h	
Broyeurs	20	220	h	
Serveurs	8	8000		
<b>Puissance totale</b>		<b>W</b>	<b>Besoin énergétique total quotidien</b>	<b>Wh</b>

**Annexe 2:** Flux monétaire cumulé des différentes solutions

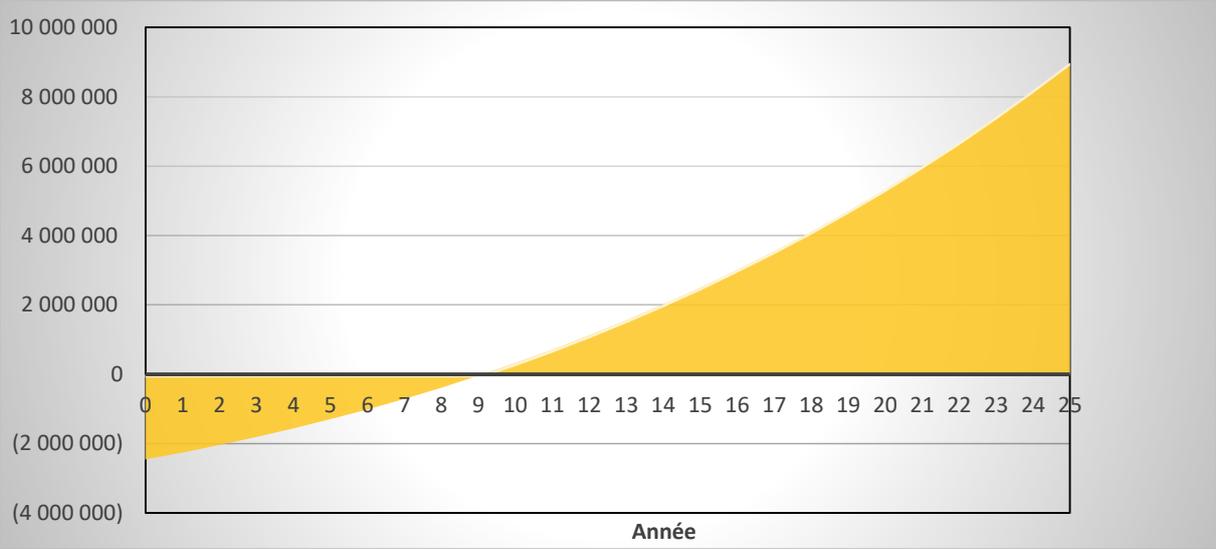


Figure 1: flux monétaire cumulé de la solution A

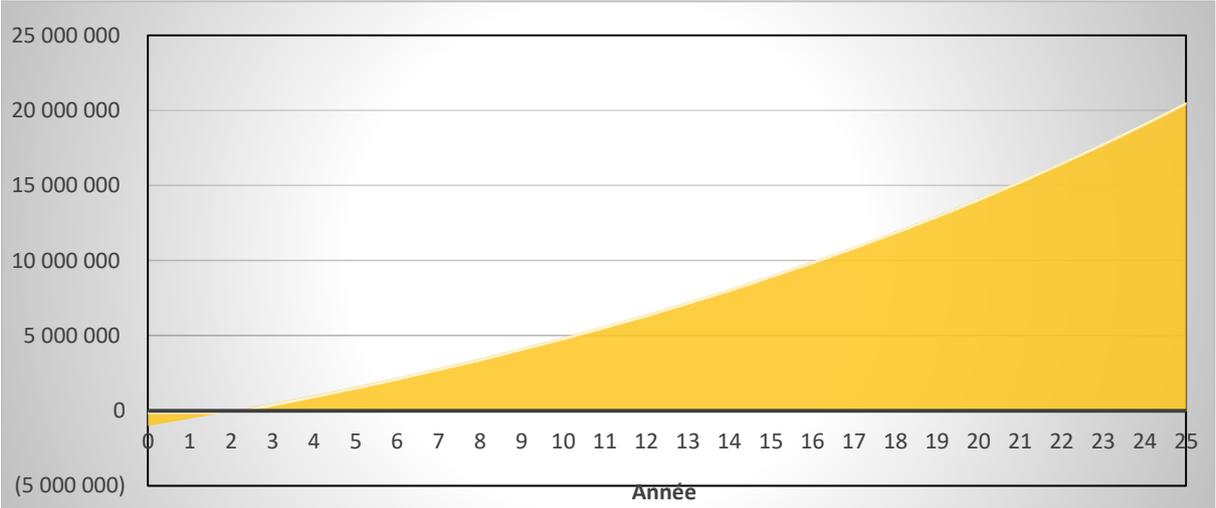


Figure 2: flux monétaire cumulé de la solution B

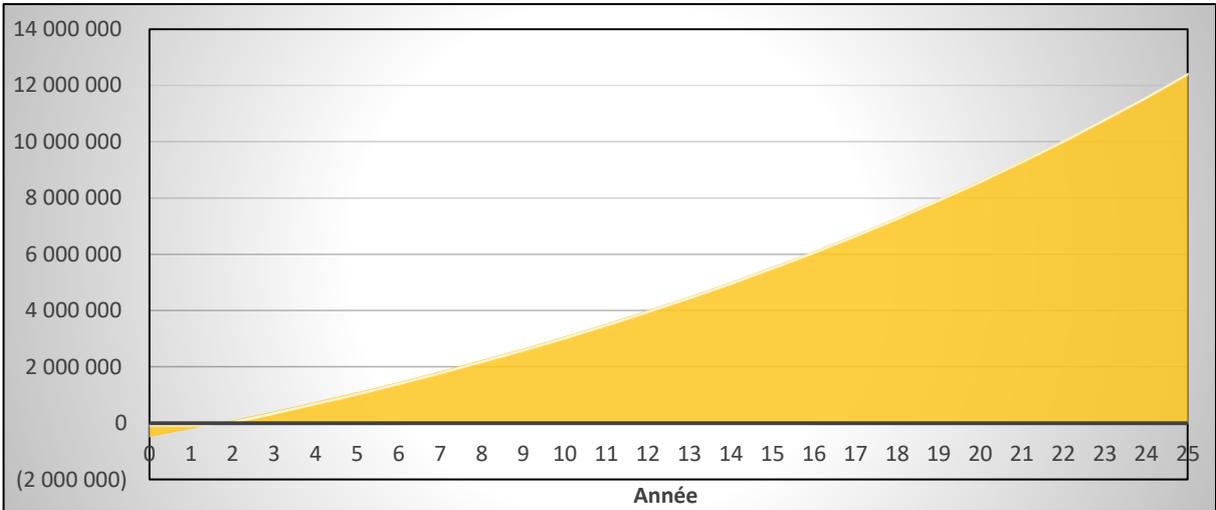


Figure 3: flux monétaire cumulé de la solution C