

Université Assane Seck de Ziguinchor



UFR : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Mémoire de master

Mention : Physique et Applications

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

Etude de solutions d'énergies renouvelables solaire-éolienne en fonction des classes de puissance dans cinq sites du Sénégal et de leur impact environnemental.

Présenté par :

Jacques Daman DIOUF

Sous la direction de :

Dr Ababacar NDIAYE

Soutenu publiquement le 15 Janvier 2021 devant le jury composé de :

M. Bamol Ali Sow	Maître de Conférences	UASZ/UFR ST	Président
M. Joseph Sambasène Diatta	Maître-Assistant	UASZ/UFR ST	Rapporteur
M. Samo Diatta	Maître-Assistant	UASZ/UFR ST	Examineur
M. Mouhamadou Sy	Assistant Stagiaire	UASZ/UFR ST	Examineur
M. Ababacar NDIAYE	Maître-Assistant	UASZ/UFR ST	Encadrant

Année Académique 2019/2020

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

A

Mes Parents

A mon père Théophile D.F.O.U.F

A ma mère Lucie D.F.A.T.T.A

Mes frères et sœurs

Toute ma famille

Tous mes ami (e)s

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à DIEU, le tout puissant, pour m'avoir donné la santé, le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche. Le travail présenté dans ce mémoire a été mené au Laboratoire d'Océanographie des Sciences de l'Environnement et du climat (L.O.S.E.C.) de l'université Assane Seck de Ziguinchor. Mais avant de présenter les résultats du travail, permettez-moi de témoigner ici ma très grande reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Je voudrais aussi, dans un premier temps, remercier vivement mon encadrant M. Ababacar NDIAYE, enseignement chercheur à l'université Assane Seck de Ziguinchor, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

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

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de mes camarades de classes (Mme Fatou Khoulé, M. Dioumacor Faye, M. Adama Thiandoum, M. Amadou Diouf, M. Assane Ndiaye et M. David Sagna) et à tous les doctorants et post-master du L.O.S.E.C.

Je remercie tous ceux et celles qui m'ont épaulé durant toutes ces années. Sans eux ce mémoire n'aurait pas lieu. Je veux citer mon homonyme M. Daman Cissokho et M. Raphael Lambal.

Un grand merci à ma mère et à mon père, qui m'ont toujours fait confiance dans mes études et m'ont soutenu dans tous les domaines et aux familles Mendy, Diatta, Diouf et Diédhiou plus particulièrement M. Léon Mendy et Mme Marianne Mendy ; Mme Madeleine Diatta, Mme Michelle Diatta, M. Christine Diatta, M. Michel Diédhiou et M. Joseph Diédhiou.

Tables des Matières

DEDICACES	i
Remerciements.....	ii
Tables des Matières	iii
Liste des figures	v
Liste des Tableaux.....	vi
Liste des abréviations	vii
Résumé	ix
Abstract.....	x
Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur les énergies solaire, éolienne et systèmes hybrides	3
I.1. Energie solaire photovoltaïque	3
I.1.1 Ressource solaire.....	3
I.1.1. Effet photovoltaïque	4
I.1.2. Les Composants d'une installation photovoltaïque	5
I.1.2.1. Les modules photovoltaïques.....	5
I.1.2.2. Les batteries	7
I.1.2.3. Les régulateurs de charge.....	7
I.1.2.4. Les Convertisseurs.....	8
I.2. Energie éolienne	8
I.2.1. Définition	8
I.2.2. Les différents types d'éoliennes.....	9
I.2.2.1. Eolienne à axe horizontal.....	9
I.2.2.2. Eolienne à axe vertical.....	10
I.3. Systèmes hybrides	10
I.3.1. Définition	10
I.3.2. Classification des systèmes hybrides.....	11
Chapitre II : Outils et Méthodes.....	13
II.1. Présentation des différents sites ciblés pour l'étude.....	13
II.2. Présentation des données	14
II.2.1. Evaluation du potentiel solaire des différents sites choisis	14
II.2.2. Evaluation du potentiel éolien des différents sites choisis	15
II.2.3. Bilan de Puissances	16

II.2.3.1. Présentation des différentes applications ciblées pour l'étude	16
II.2.3.2. Profils de charge journaliers des différentes applications	18
II.2.3.3. Bilan de la consommation Energétique journalière	19
II.3. Méthodologie utilisée	19
II.3.1. Dimensionnement manuel	20
II.3.2. Présentation du logiciel Homer.....	22
II.3.3. Les différentes étapes de la simulation	23
Chapitre III : Etudes comparative et d'impact environnemental des solutions	25
III.1 Etude comparative des solutions	25
III.1.1. Présentation des différentes configurations	25
III.1.2. Solutions globales	26
III.1.3. Comparaison des solutions globales.....	29
III.1.4. Solutions optimales	31
III.1.5. Comparaison des solutions optimales	32
III. 2 Etude d'impact environnemental des solutions optimales	34
III.2.1. La diminution des gaz à effet de serre : une nécessité, un atout	34
III.2.2 Bilan Carbone	35
III.2.3. Bilan carbone des solutions optimales proposées	36
Conclusion Générale	38
BIBLIOGRAPHIE.....	39

Liste des figures

Figure 1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre[4].....	4
Figure 2 : Effet photovoltaïque [6].....	5
Figure 3 : Champ photovoltaïque [7]	5
Figure 4 : Batteries au plomb fermées [9]	7
Figure 5 : Régulateur [10].....	8
Figure 6 : Onduleur [11].....	8
Figure 7 : Conversion de l'énergie cinétique du vent : [12].....	9
Figure 8 : Eoliennes à axe horizontal [14].....	10
Figure 9 : Eoliennes à axe vertical [16].....	10
Figure 10 : Répartition des systèmes hybrides.....	11
Figure 11 : Présentation des différents sites	14
Figure 12 : Irradiations moyennes mensuelles des différents sites	15
Figure 13 : Vitesses moyennes mensuelles des différents sites	16
Figure 14 : Profils de charge	18
Figure 15 : Consommation journalière des différentes applications	19
Figure 17 : Interface principale de HOMER.....	23
Figure 16 : Principe de fonctionnement du logiciel HOMER	24
Figure 22 : Schéma d'une installation solaire.....	25
Figure 23 : Schéma d'une installation éolienne	25
Figure 24 : Schéma d'une installation hybride (solaire + éolien)	26
Figure 25 : Comparaison des solutions en terme de cout de revient de l'énergie.....	30
Figure 26 :Comparaison des solutions optimales en fonction de la puissance totale du système	32
Figure 27 : Comparaison des solutions optimales en fonction de la capacité de stockage	33
Figure 28 : Comparaison des solutions optimales en terme du coût de revient de l'énergie.....	34
Figure 29 : Bilan carbone des solutions optimales.....	36

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Comparatif des différentes technologies	6
Tableau 2 : Puissance installée et consommation de l'application « Ecole et Case de Santé »	17
Tableau 3 : la Puissance installée et la consommation de l'application « site de pompage » ..	17
Tableau 4 : La Puissance installée et la consommation de l'application « site d'élevage ».....	17
Tableau 5 : La Puissance installée et la consommation de l'application « Système multifonction »	17
Tableau 6 : Présentation des solutions pour le site de Ziguinchor	27
Tableau 7 : Présentation des solutions pour le site de Kaolack	27
Tableau 8 : Présentation des solutions pour le site de Sakhor	28
Tableau 9 : Présentation des solutions pour le site de Gandon	28
Tableau 10 : Présentation des solutions pour le site de Kayar	29
Tableau 11 : Présentation des solutions optimales	31

Liste des abréviations

EnR : énergie renouvelable

GES : Gaz à effet de serre

PV : Photovoltaïque

SH : Système hybride

SHSER : Système hybride à sources d'énergie renouvelables

ADEME : Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

SENELEC : Société Nationale d'électricité

MDP : Mécanisme de développement propre

CC : Convertisseur continu

CA : Convertisseur Alternatif

P_c : Puissance crête

E_p : Energie à produire

E_c : Energie à consommer

K_1 : Coefficient de perte

kW : kilo Watt

kWc : kilo Watt crête

kWh : kilo watt heure

MWh : Méga Watt heure

I_j : Irradiation solaire journalière

K_p : coefficient de perte = 0,6

N_{srie} : nombre de panneaux en série

N_{palle} : nombre de panneaux en parallèle

U.batt : tension de la batterie

U_{mod} : tension du module

P_{mod} : puissance du module

P_{inst} : Puissance à installer

I_r = intensité du régulateur

I_m = intensité (courant) maximale que délivre le champ PV

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

N_{reg} = nombre de régulateur

C_b : Capacité de la batterie

N_b : Nombre de batterie(s)

$C_{unt.b}$: Capacité unitaire de la batterie

N_{ond} : nombre d'onduleur

P_{ond} : puissance de l'onduleur générale

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

U_{syst} : tension système

Résumé

Ce travail, portant sur étude de solutions d'énergies renouvelables solaire-éolienne en fonction des classes de puissance dans cinq sites du Sénégal et de leur impact environnemental, contribue à la protection de l'environnement pour lutter contre le changement climatique. Elle permettra aussi aux localités éloignées du réseau électrique d'être bien indépendantes en matière d'énergie électrique, ce qui facilitera leur développement socioéconomique. Le travail réalisé consiste à analyser et à comparer un ensemble de systèmes énergétiques pour répondre aux besoins de la consommation de quatre applications (école et case de santé, pompage, élevage, système multifonction) de manière totale selon divers sites (Ziguinchor, Kayar, Kaolack, Gandon et Sakhor). Ainsi, la faisabilité des systèmes proposés est effectuée par le logiciel HOMER. Ce logiciel est utilisé pour proposer des solutions autonomes telles que PV/batteries, PV/batteries/éolienne et éolienne/batteries pour chacune des applications sur les différents sites. Pour les simulations, des contraintes ont été appliquées pour optimiser les résultats dans le but d'obtenir des coûts d'investissements et des prix de revient de l'énergie beaucoup plus avantageux. L'analyse des résultats obtenus a montré que, la configuration PV/batteries est la meilleure solution pour les sites de Kaolack et Ziguinchor. Pour les sites de Kayar, Gandon et Sakhor, c'est la configuration PV/éolienne/batteries qui est la meilleure solution. La comparaison des solutions optimales en terme de coût de revient de l'énergie montre que les sites de Ziguinchor, Kaolack et Gandon sont les meilleurs. Sur le plan environnemental, les résultats montrent que les solutions optimales obtenues sur l'ensemble des sites permettent d'éviter une émission de 185,287 t.E.CO₂/an.

Mots clés : impact environnemental, solaire, éolien.

Abstract

This work, studying renewable solar-wind energy solutions according to power classes in five sites in Senegal and their environmental impact, contributes to the protection of the environment in the fight against climate change. It will also enable localities remote from the electricity grid to be well independent in terms of electrical energy, which will facilitate their socio-economic development. The work carried out consists of analysing and comparing a set of energy systems to meet the consumption needs of four applications (school and health hut, pumping, livestock, multifunction system) in a total way according to various sites (Ziguinchor, Kayar, Kaolack, Gandon and Sakhor). Thus, the feasibility of the proposed systems is carried out by the HOMER software. This software is used to propose stand-alone solutions such as PV/batteries, PV/batteries/wind turbine and wind turbine/batteries for each of the applications on the different sites. For the simulations, constraints have been applied to optimise the results in order to obtain much lower investment costs and energy cost prices. Analysis of the results obtained showed that the PV/battery configuration is the best solution for the Kaolack and Ziguinchor sites. For the Kayar, Gandon and Sakhor sites, the PV/wind turbine/battery configuration is the best solution. A comparison of the optimal solutions in terms of energy costs shows that the Ziguinchor, Kaolack and Gandon sites are the best. From an environmental point of view, the results show that the optimal solutions obtained on all the sites make it possible to avoid an emission of 185,287 t.E. CO₂/year.

Keywords: environmental impact, solar, wind.

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 67% de cette demande et les énergies renouvelables 20% (2020) [2].

L'énergie est très importante pour les besoins humains. Avec l'évolution démographique, le besoin en énergie ne cesse d'augmenter. Ce problème d'énergie est encore plus sensible dans les sites isolés où l'utilisation des ressources classiques s'avère souvent très coûteuse. En effet, plusieurs contraintes, comme le transport du combustible, le coût et les entretiens périodiques des moteurs diesels, rendent la recherche d'une source d'énergie alternative indispensable dans les sites isolés.

Au Sénégal, de nombreux sites se trouvent loin du réseau électrique, donc les coûts de raccordement au réseau y sont très élevés. Alors, les systèmes autonomes sont intéressants pour répondre aux besoins en électricité de ces habitants. Les énergies fossiles restent les plus utilisées de nos jours, malgré leurs coûts élevés et leurs caractères polluants. Les systèmes autonomes, à sources d'énergies renouvelables (Solaire et/ou Eolienne), sont donc une solution potentielle limitant la pollution et le coût de revient de l'énergie en profitant des énergies primaires propres et gratuites. Ces systèmes permettent d'instaurer un environnement propice à la création d'activités rémunératrices ou d'activités permettant d'accroître le revenu.

L'objectif général de ce travail est de développer un catalogue de solutions à énergies renouvelables pour satisfaire les diverses classes de puissance selon les sites d'implantations.

Cet objectif général se traduit par les objectifs spécifiques ci-après :

Dans un premier temps, les potentiels solaire et éolien des sites choisis seront évalués. Ensuite, le choix des technologies utilisées et la présentation de la méthodologie de dimensionnement des solutions sur le logiciel HOMER seront effectués.

La simulation de diverses configurations « PV + Batteries, éolienne + Batteries et hybride (PV+éolien+Batteries) » de solutions sera réalisée en situation hors réseau, à l'aide du logiciel HOMER, pour les diverses classes de puissance considérées et selon les divers sites d'étude.

Les résultats des simulations seront analysés selon le coût d'investissement, le coût de revient de l'énergie et les émissions de CO_2 évitées, cela permet de déterminer, pour chaque classe de puissance, la solution optimale selon les sites d'étude.

Enfin, une comparaison des solutions optimales, pour chaque classe de puissance sera faite, afin d'identifier, pour chaque application, le site le plus intéressant. La contribution de chaque solution à la lutte au changement climatique sera évaluée.

Ce mémoire s'articule autour de trois (3) chapitres. Le premier chapitre porte sur les généralités sur les énergies solaire, éolienne et systèmes hybrides. Le second chapitre sera consacré à la description des données utilisées et de la méthodologie adoptée. Enfin, le troisième chapitre est réservé à la comparaison des solutions proposées et à l'impact environnemental des solutions optimales.

Chapitre I : Généralités sur les énergies solaire, éolienne et systèmes hybrides

Ce chapitre est consacré aux généralités sur les énergies renouvelables (solaire photovoltaïque et éolienne). La première partie sera dédiée aux énergies solaires plus précisément le photovoltaïque et à son principe de fonctionnement. La deuxième partie, sera consacrée à l'énergie éolienne et à son principe de fonctionnement. Nous terminerons ce chapitre par une étude des systèmes hybrides.

I.1. Energie solaire photovoltaïque

I.1.1 Ressource solaire

Par analogie avec d'autres sources d'énergie, l'éclairement solaire peut être considéré comme un gisement ou une ressource. Plusieurs voies de conversion énergétique sont possibles pour l'exploiter : la conversion directe en énergie électrique par cellule photovoltaïque ; la conversion directe en énergie thermique par capteur solaire thermique (par exemple, pour la production d'eau chaude sanitaire) ; la conversion thermodynamique en énergie électrique associant capteur solaire thermique, turbine ou moteur thermique et générateur électrique ; et la conversion en énergie chimique par voie photochimique (production d'hydrogène par photolyse de l'eau). L'éclairement solaire couvre pour 98 % un spectre de longueur d'onde assez large de 0,3 μm à 4 μm . Il est dit total lorsqu'il est intégré sur tout le spectre. Les voies thermiques ou thermodynamiques exploitent cet éclairement total ; la conversion photovoltaïque n'exploite, quant à elle, qu'une partie plus restreinte du spectre en fonction de la nature du ou des semi-conducteur(s) utilisé(s) [3].

Le rayonnement global est l'énergie rayonnante totale du soleil, qui atteint une surface horizontale à la surface de la Terre au cours d'une unité de temps précise. Il est d'environ 1.000 W/m^2 pour un rayonnement solaire vertical. Le rayonnement global s'obtient en ajoutant trois types de rayonnement : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi. La production électrique de cellules photovoltaïques sur un plan orienté dépend de l'éclairement global.

La figure 1 montre la répartition spectrale du rayonnement solaire.

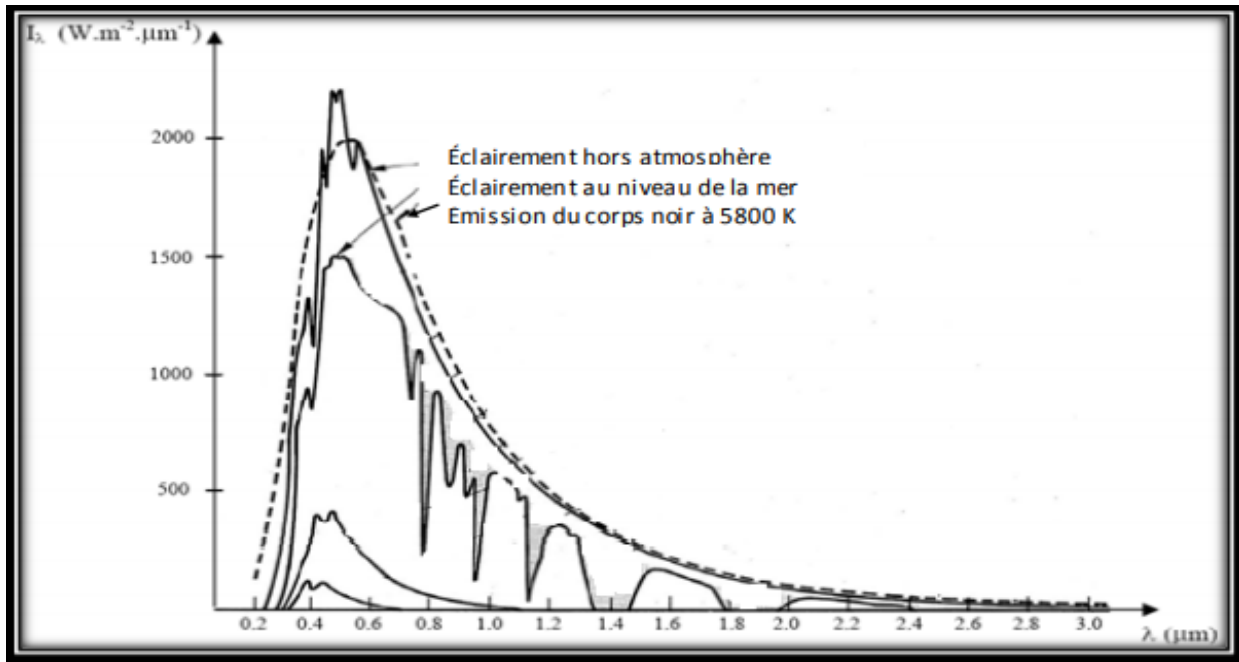


Figure 1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre[4]

I.1.1. 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 (figure 2). Il a été découvert en 1839 par un physicien français appelé EDMOND BECQUEREL.

L'énergie solaire photovoltaïque fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières années. Celle-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire [5].

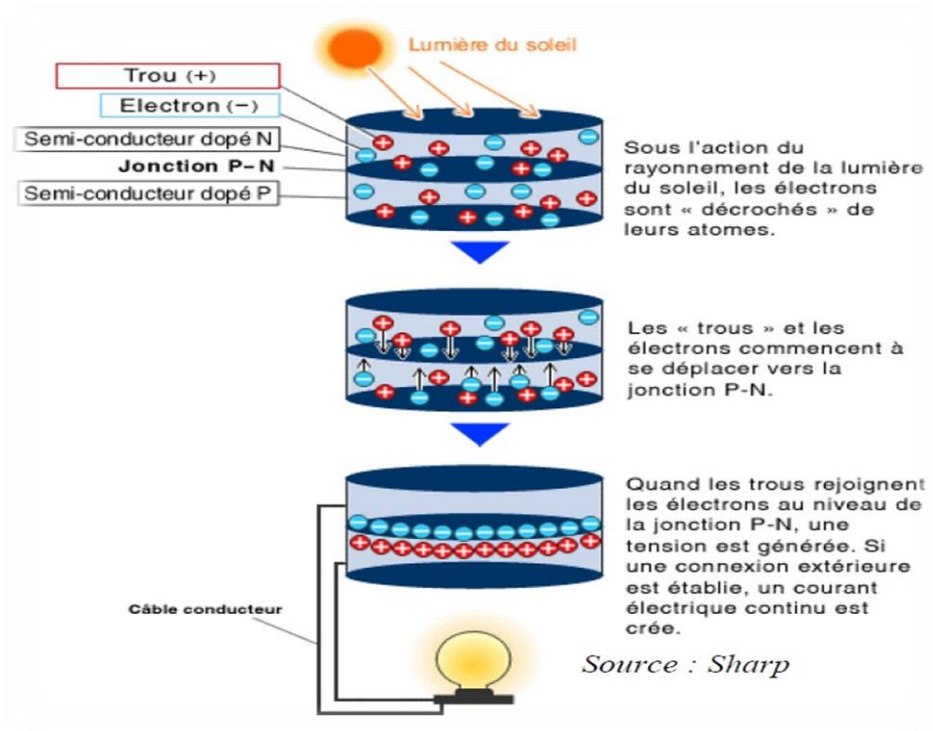


Figure 2 : Effet photovoltaïque [6]

I.1.2. Les Composants d'une installation photovoltaïque

I.1.2.1. Les modules photovoltaïques

Un module photovoltaïque est un assemblage de plusieurs cellules connectées entre elles et l'assemblage de plusieurs modules entre elles aboutissent à un panneau photovoltaïque. Et enfin l'ensemble de ces modules et panneaux constituent le champ photovoltaïque comme nous pouvons le remarquer sur la Figure 2.

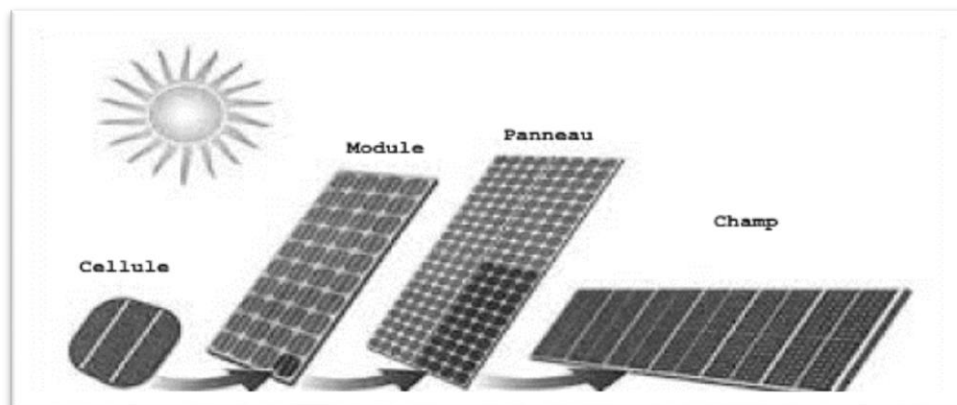



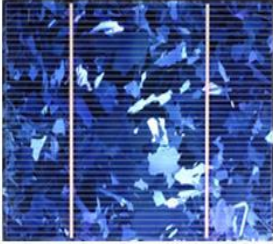

Figure 3 : Champ photovoltaïque [7]

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 bleue en générale. Les cellules photovoltaïques monocristallines ont un rendement moyen de 19%.
- Les cellules polycristallines : 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 [8].

Tableau 1 : Comparatif des différentes technologies

Modules	Caractéristiques
<p>Monocristallin</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Très bon rendement : 14 à 19 %. - Durée de vie : importante (30 ans) - Coût de fabrication : élevé. - Puissance : 100 à 150 Wh/m². - Rendement faible sous un faible éclairement. - perte de rendement avec l'élévation de la température. - Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal - Couleur bleue uniforme
<p>Polycristallin</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Bon rendement : 11 à 15 %. - Durée de vie : importante (30 ans) - Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins - Puissance : 100 Wh/m². - Rendement faible sous un faible éclairement. - Perte de rendement avec l'élévation de la température. - Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. - Ces cellules sont bleues, mais non uniforme
<p>Amorphe</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement faible : 5 à 9 %. - Durée de vie : assez importante (20 ans) - Coût de fabrication : peu coûteux par rapport aux autres technologies - Puissance : 50 Wh/m². - Fonctionnement correct avec un éclairement faible. - Peu sensible aux températures élevées. - Utilisables en panneaux souples. - Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium. - Rendement faible en plein soleil. - Performances diminuant avec le temps. - 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.

I.1.2.2. Les batteries

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert). Une batterie utilisée avec des panneaux solaires ou une éolienne, est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires ou éoliennes. Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes.

On distingue différents types de batteries : batteries au plomb (figure 4), batteries au nickel, batteries au Lithium.

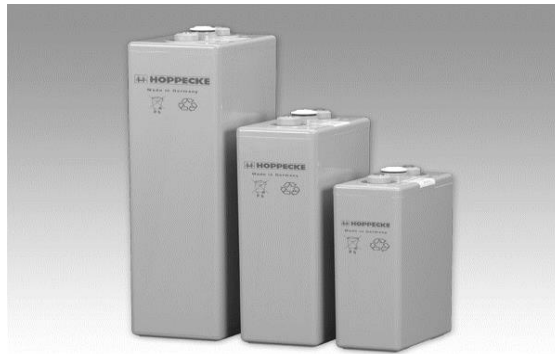


Figure 4 : Batteries au plomb fermées [9]

I.1.2.3. Les régulateurs de charge

Le régulateur permet de charger un parc de batteries avec un ou plusieurs panneaux solaires (figure 5). Il assure la protection de votre parc de batteries en évitant toute surcharge ou décharge trop importante, cela permet d'optimiser sa durée de vie.

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

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



Figure 5 : Régulateur [10]

I.1.2.4. Les Convertisseurs

Il existe deux types de convertisseurs :

- Les convertisseurs CC/CC : Ils sont utilisés pour l'alimentation de charges continues.
- Les convertisseurs CC/AC : plus connus sous l'appellation d'onduleur (figure 6), ils permettent l'alimentation de charges alternatives sous 230V AC, dans le cas des systèmes photovoltaïques.



Figure 6 : Onduleur [11]

I.2. Energie éolienne

I.2.1. Définition

Une éolienne est un appareil qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'utilisation des éoliennes peut se faire de deux manières : les éoliennes mécaniques liées au pompage de l'eau uniquement et les aérogénérateurs pour lesquels l'énergie mécanique est convertie en électricité. C'est ce dernier qui nous intéresse dans notre travail. La figure 7 illustre la conversion de l'énergie cinétique du vent.

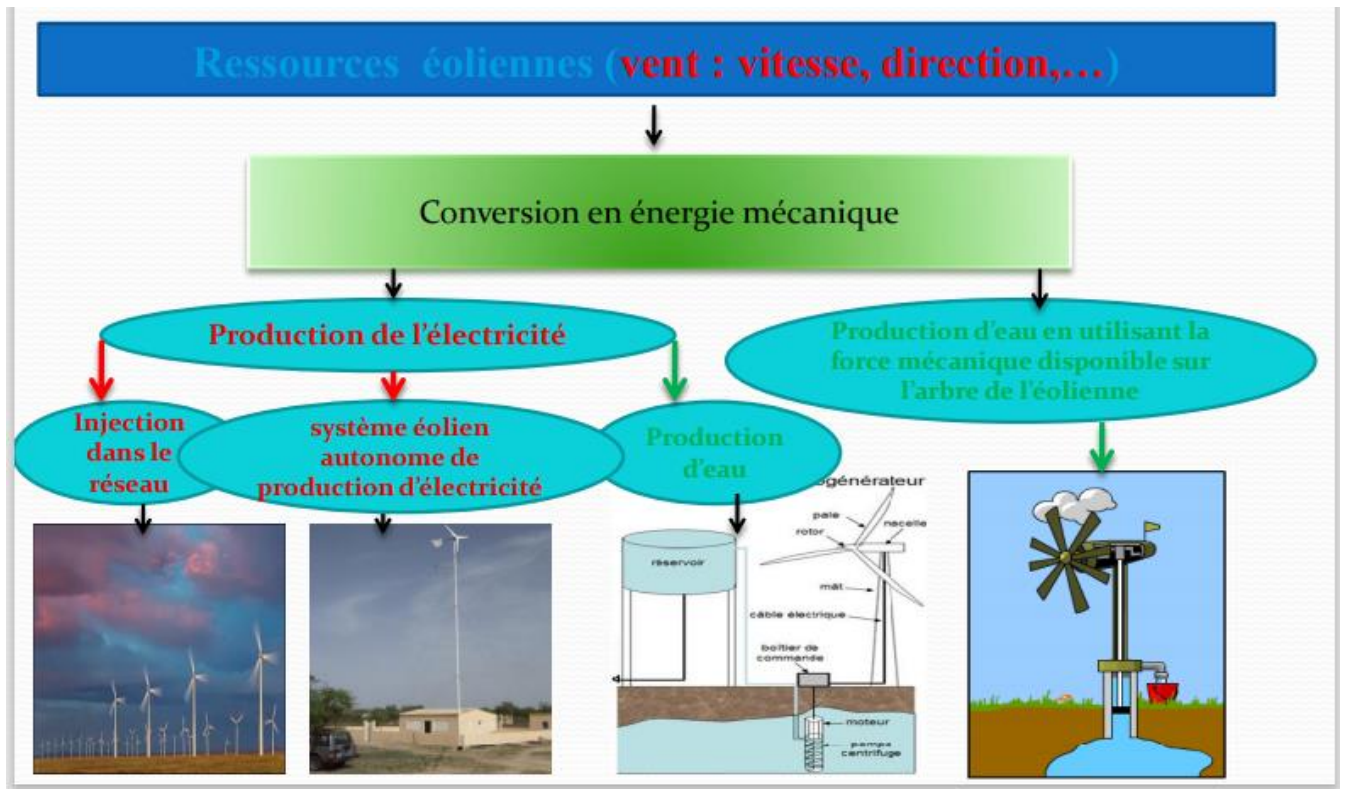


Figure 7 : Conversion de l'énergie cinétique du vent : [12]

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

I.2.2.1. Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal figure (8) 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.



Figure 8 : Eoliennes à axe horizontal [14]

I.2.2.2. Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical figure (9) ont leur axe du rotor perpendiculaire au sol. Elles n'ont pas besoin 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 [15].

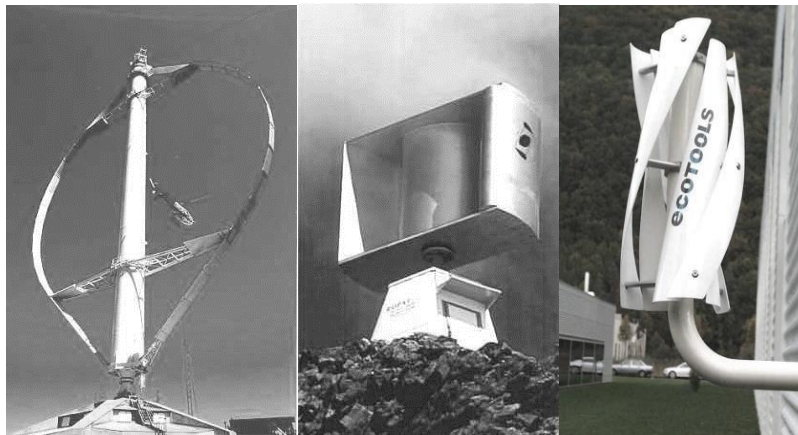


Figure 9 : Eoliennes à axe vertical [16]

I.3. Systèmes hybrides

I.3.1. Définition

Un système hybride à sources d'énergie renouvelable (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable [17]. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage.

I.3.2. Classification des systèmes hybrides

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 10.

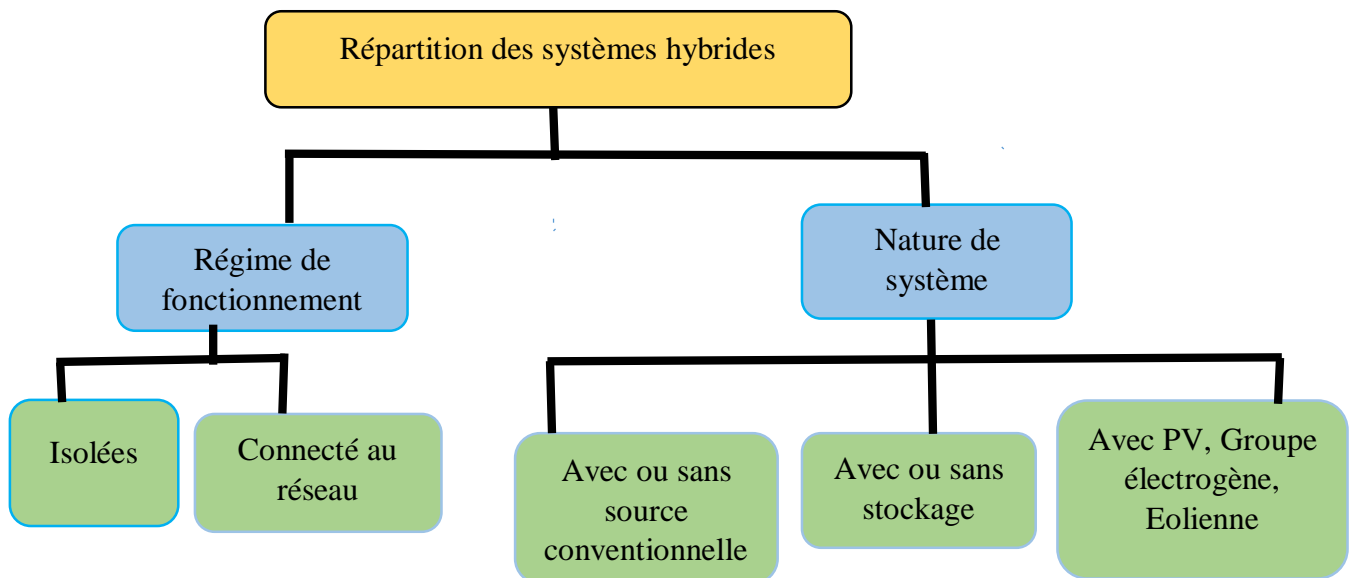


Figure 10 : Répartition des systèmes hybrides

Ce chapitre nous a permis de faire une revue des systèmes de production d'énergies renouvelables : le solaire, l'éolien et les systèmes hybrides. Il nous a permis de voir les différents composants d'une installation solaire, les différents types d'éolienne et la classification des systèmes hybrides. Dans la suite, une analyse des données et une description de la méthodologie utilisée dans le mémoire seront faites.

Chapitre II : Outils et Méthodes

Ce chapitre est dédié à la présentation des données et à la méthodologie utilisée dans nos études. Dans un premier temps, nous allons présenter les différents sites et évaluer leurs potentiels solaire et éolien. Ensuite nous présenterons les applications ciblées et leur bilan de puissance. Nous terminerons par la présentation du modèle HOMER.

II.1. Présentation des différents sites ciblés pour l'étude

Dans le cadre de ce travail cinq sites ont été choisis : Gandon, Kayar, Sakhor, Kaolack et Ziguinchor. Notre choix a été guidé par la disponibilité des données dans ces sites. Ce choix s'explique également par une volonté de balayer un ensemble de points pour voir la différence qui existe entre les sites situés près de la côte et ceux qui sont à l'intérieur du pays (voir figure 11).

- Gandon est une commune située dans la région de Saint-Louis, sur la grande côte sénégalaise (près de l'océan). Ses coordonnées géographiques sont 15,59° Nord et 16,44° ouest.
- Kayar est situé dans la région de Thiès. Il est également situé à proximité de l'océan (grande côte). Ses coordonnées géographiques sont 14,59° Nord et 17,12° Ouest.
- Sakhor est un village se trouvant dans la région de Fatick. Il est situé à côté de la mer. Ses coordonnées géographiques sont 14,23° Nord et 16,52 Ouest.
- Kaolack est une ville située au centre du Sénégal. Ses coordonnées géographiques sont 14° Nord et 15,25° Ouest.
- Ziguinchor est située au sud du Sénégal (Casamance). C'est une zone pluvieuse et assez éloignée de l'océan mais est traversée par le fleuve Casamance. Ses coordonnées géographiques sont 12,6° Nord et 16,3 Ouest.



Figure 11 : Présentation des différents sites

II.2. Présentation des données

II.2.1. Evaluation du potentiel solaire des différents sites choisis

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus abondantes. Elle peut être utilisée aussi bien pour la production de chaleur que pour la production d'électricité. Toutefois, l'énergie solaire disponible dépend fortement de sa variabilité spatiale et temporelle. Une bonne connaissance de son potentiel est donc nécessaire pour la conception, l'installation et l'étude de performance des systèmes solaires adaptés [18].

Les données d'irradiation pour les sites de Kayar, Sakhor et Gandon sont des données mesurées. Tandis que pour les sites de Kaolack et de Ziguinchor, ces données sont issues du logiciel Retscreen (données satellitaires). La figure 12 montre l'irradiation solaire mensuelle ($\text{kWh/m}^2/\text{j}$) sur tous les sites d'étude. Elle montre que pour l'ensemble des sites, l'irradiation solaire moyenne est comprise entre $4,19 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ (sur le site de Ziguinchor au mois de Décembre) et $6,68 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ (sur le site de Kaolack au mois d'Avril).

Les mois, les plus favorables sont Mars, Avril et Mai. La durée d'ensoleillement importante pendant ces mois, pourrait être la raison. Les mois de Décembre et Janvier sont les plus défavorables.

Les valeurs moyennes d'irradiation solaire annuelle de Sakhor, Kaolack, Kayar, Gandon, et Ziguinchor sont respectivement de 5,65 kWh/m²/j, 5,59 kWh/m²/j, 5,42 kWh/m²/j, 5,27 kWh/m²/j et 4,86 kWh/m²/j. Le site de Sakhor présente la plus grande valeur.

Ces données montrent l'existence d'un bon potentiel solaire pour la production d'électricité. Ce potentiel est également exploitable durant toute l'année.

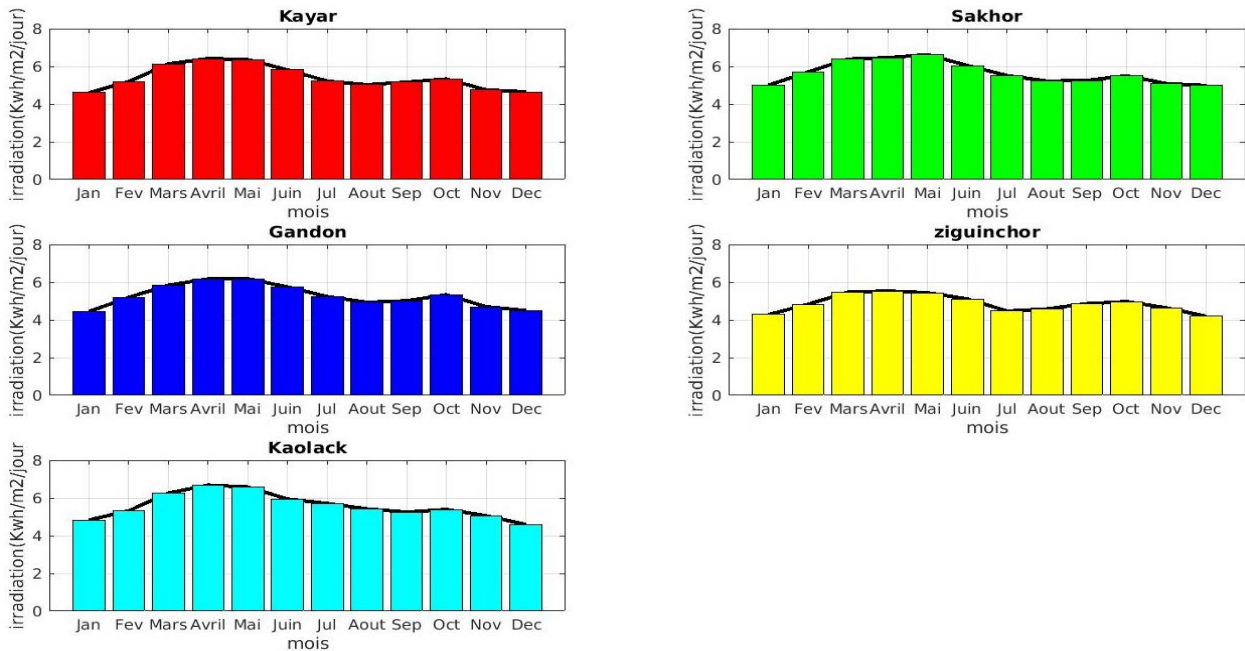


Figure 12 : Irradiations moyennes mensuelles des différents sites

II.2.2. Evaluation du potentiel éolien des différents sites choisis

La vitesse du vent est un paramètre déterminant dans l'exploitation du potentiel éolien pour la production d'électricité à l'aide d'aérogénérateurs. Les données des vitesses moyennes pour les sites de Kayar, Sakhor et Gandon sont des données mesurées. Tandis que pour les sites de Kaolack et de Ziguinchor, ces données sont issues du logiciel Retscreen (données satellitaires). La figure 13 montre les vitesses moyennes mensuelles du vent de tous les sites (vitesse de vent mesurée à 20m d'altitude). Les mois d'avril et de mai sont plus favorables pour les sites de Sakhor, Gandon et Kayar. Pour Kaolack, les mois de mars et d'avril sont plus opportuns. Ces vitesses de vent fortes pendant ces périodes, peuvent être la résultante de l'établissement de l'alizé continental. Enfin, pour le site de Ziguinchor, les mois de mai et juin sont plus propices. Ce qui pourrait être dû aux vents du sud-ouest. Les vitesses moyennes annuelles sont : Ziguinchor (3,89m/s), Kaolack (3,007 m/s), Kayar (4,31 m/s), Gandon (4,34 m/s) et Sakhor (4,36 m/s).

Ces valeurs montrent un bon potentiel pour les sites de Kayar, Sakhor et Gandon et un potentiel moyen pour Ziguinchor et Kaolack.

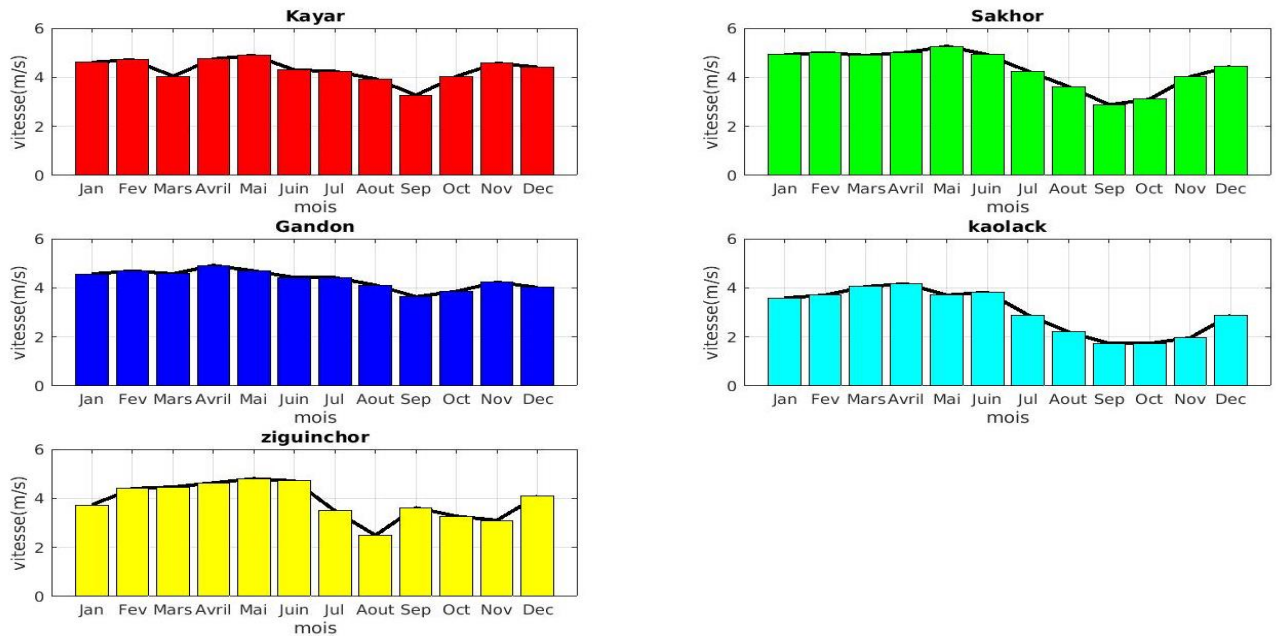


Figure 13 : Vitesses moyennes mensuelles des différents sites

II.2.3. Bilan de Puissances

Le bilan de Puissances 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.

II.2.3.1. Présentation des différentes applications ciblées pour l'étude

Les applications ciblées pour cette étude sont :

- Une école primaire et une case de santé

Tableau 2 : Puissance installée et consommation

Appareil(s)	Nombre	Puissance unitaire (W)	Nombre d'heures cumulées/jour	consommation/jour (Wh)
Lampe	12	8	98	784
Lap top	2	60	14	840
Imprimante	2	33	10	330
Petit frigo	1	50	19	950
Réfrigérateur classe D	1	76	19	1444
Téléphone portable	3	4.2	57	239.4
Téléviseur	1	130	6	780
Ventilateur	3	18	20	360

- Un site de pompage

Tableau 3 : Puissance installée et consommation

Appareil(s)	Nombre	Puissance unitaire (W)	Nombre d'heures cumulées/jour	Consommation/jour (Wh)
Pompe	1	452.5	11.25	5090.625
Lampe	1	8	5	40
Réfrigérateur	1	50	19	950
Téléphone portable	4	4.2	64	268.8

- Un site d'élevage

Tableau 4 : Puissance installée et consommation

Appareil(s)	Nombre	Puissance unitaire (W)	Nombre d'heures cumulées/jour	Consommation/jour (Wh)
Pompe	1	452.5	7.7	3484.25
Lampe	20	8	220	1760
Réfrigérateur	3	80	57	4560

- Un système multifonction regroupant quelques ateliers.

Tableau 5 : Puissance installée et consommation

Appareil(s)	Nombre	Puissance unitaire (W)	Nombre d'heures cumulées/jour	Consommation/jour (Wh)
Tondeuse	1	15	12	180
Lampe	6	8	68	544
Téléphone Portable	5	4.2	18	75.6
Ventilateur	2	18	23	414
Radio	2	5	23	115
Machine à moudre	1	1100	8	8800
Machine à coudre	2	85	24	2040

Pour chacune de ces applications, des solutions à énergies renouvelables sont proposées pour satisfaire leurs besoins énergétiques. Ces solutions d'énergies renouvelables permettront aux populations de ces différents sites, d'avoir de l'électricité et de développer des activités génératrices de revenus.

II.2.3.2. Profils de charge journaliers des différentes applications

Le profil de charge désigne la consommation aux différentes heures de la journée. Elle montre aussi la manière dont la puissance est consommée.

La figure 14 représente les profils de charge des différentes applications.

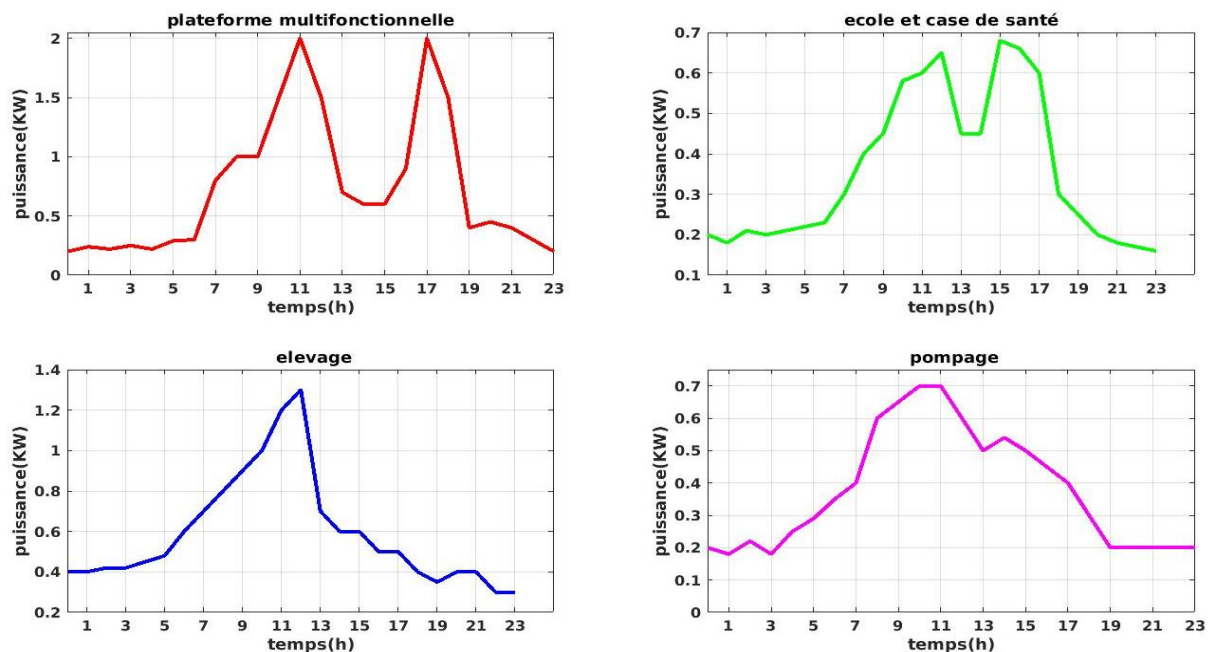


Figure 14 : Profils de charge

La figure 14 montre le profil de charge des différentes applications. Elles montrent l'utilisation des appareils électriques (les appels de puissances) en fonction des heures de la journée. On constate que la puissance commence à évoluer de manière significative vers 6 heures 30 pour toutes les applications. Pour les applications « école et case de santé » et « système multifonction », on note 2 pics, le premier est observé à 11 heures et le second vers 17 heures. Ces pics peuvent s'expliquer par le fait que ces périodes correspondent aux heures de travail. On note aussi une pause entre 13 heures et 15 heures marquée par une baisse de charge. Pour les applications « pompage » et « élevage », un seul pic a été observé vers 11 heures. Au-delà de cette heure la puissance baisse de manière progressive. Pendant la nuit, la puissance consommée est moins importante mais ne s'annule pas. Certains appareils fonctionnent.

II.2.3.3. Bilan de la consommation Énergétique journalière

Le bilan de la consommation énergétique permet de déterminer la consommation énergétique des différentes applications. La figure 15 montre le bilan de la consommation journalière des différentes applications. On note sur cette figure que le système multifonction occupe la plus grande partie dans la consommation avec 17 036,04 kWh. En effet, cela s'explique par le nombre et la puissance des appareils qu'on y trouve. Alors que, les autres applications ont moins d'appareils de grande puissance.

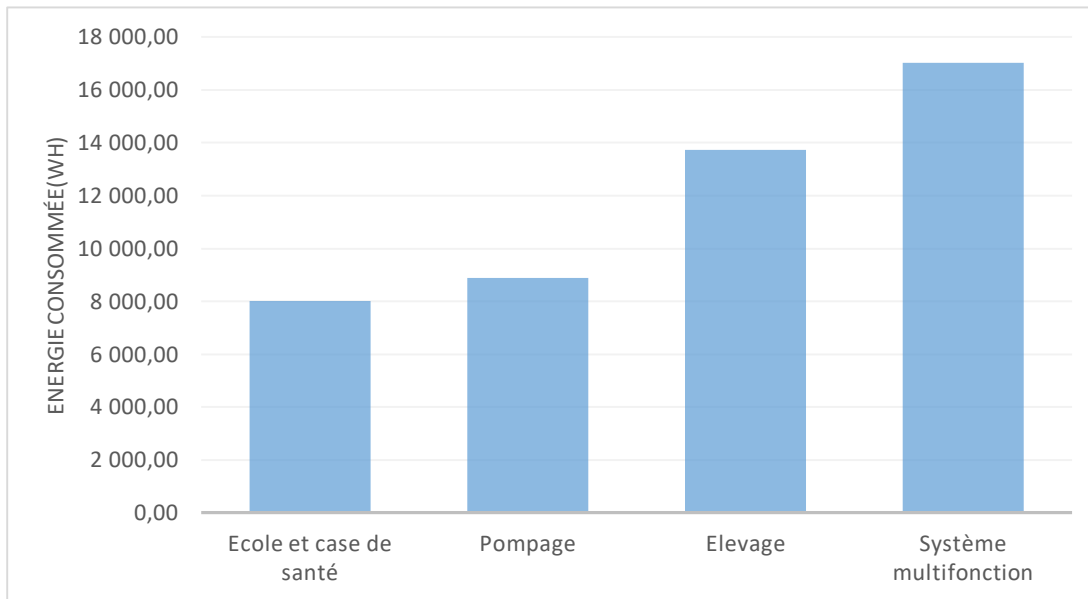


Figure 15 : Consommation journalière des différentes applications

II.3. Méthodologie utilisée

La conception d'un système d'énergie exige la sélection et le dimensionnement de la combinaison la plus appropriée des différents composants du système, ainsi que l'implémentation d'une stratégie de fonctionnement efficace. Les logiciels de dimensionnement sont des outils indispensables pour l'analyse et la comparaison des différentes combinaisons possibles des sources utilisées dans les systèmes d'énergies. Dans ce mémoire, nous avons utilisé un (1) logiciel destiné à la simulation des systèmes d'énergies renouvelables HOMER.

Les principaux facteurs pour le dimensionnement sont :

- Les conditions environnementales du site (ensoleillement, température, humidité, vitesse du vent) ;
- Le profil de la courbe de charge (consommation) ;
- Les ressources financières ;

- La disponibilité de la technologie et le support technique

II.3.1. 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 :

$$E_p = E_c * K_1 \quad (1)$$

K_1 : Coefficient de perte = 1,4

❖ Calcul de la puissance crête à installer

La puissance crête est la puissance maximale mesurée dans la condition standard de test : ensoleillement nominal de 1000 W/m² et température 25° C. Elle est obtenue avec la formule (2) suivante :

$$P_c = \frac{E_p}{I_j * k_p} \quad (2)$$

E_p : Énergie à produire

k_p : Coefficient de perte = 0,6

I_j : Irradiation journalière.

❖ 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 :

$$N_{srie} = \frac{U.batt}{U.mod} \quad ; \quad N_{plle} = \frac{P_c}{P.mod} \quad (3)$$

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 (4).

$$P_{inst} = N_{srie} * N_{pille} * P.mod \quad (4)$$

P_{inst} : Puissance à installer

❖ Dimensionnement du régulateur

Pour faire un bon dimensionnement du régulateur, il nous faut connaître la tension nominale et l'intensité maximale du PV. Ces dernières sont obtenues respectivement avec les formules (5) et (6) ci-dessous. Ensuite le nombre régulateur du système est calculé avec la formule (7).

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

I_r = intensité du régulateur

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

1,5 : représente les pertes engendrées par le régulateur

$$I_m = \frac{P_{inst}}{U_{syst}} \quad (6)$$

$$N_{reg} = \frac{I_r}{I_{unt.reg}} \quad (7)$$

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

N_{reg} = nombre de régulateur

❖ Dimensionnement du stockage

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

$$C_b = \frac{E_p * Autonomie(nbre de jour)}{U_{syst} * degré de décharge(\%)} \quad (8)$$

$$N_b = \frac{C_b}{C_{unt.b}} \quad (9)$$

C_b : Capacité de la batterie

N_b : Nombre de batterie(s)

$C_{unt.b}$: 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 supérieure à la puissance pic ($P_{ond} > P_p$). Le nombre d'onduleur nécessaire pour le système est obtenu avec la formule (10).

$$N_{ond} = \frac{P_{ond}}{P_{unt.ond}} \quad (10)$$

N_{ond} : nombre d'onduleur

P_{ond} : puissance de l'onduleur générale

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

II.3.2. Présentation du logiciel Homer

HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables) 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 avec 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 a trois zones importantes (Figure 17) :

- La zone 1 permet de définir le système c'est à dire de sélectionner les différents composants du système à 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.

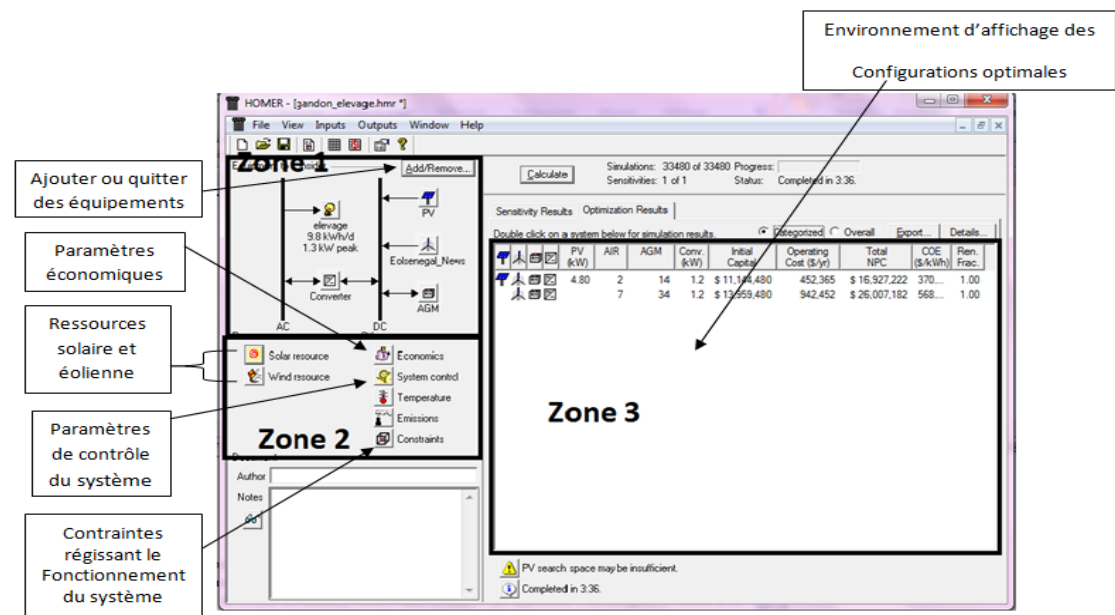


Figure 16 : Interface principale de HOMER

L'utilisation du logiciel HOMER est simple et intuitive, mais un travail de recherche en amont doit être fait minutieusement et rigoureusement pour les données entrées, surtout au niveau des coûts des équipements. Si ce travail n'est pas effectué correctement et sérieusement, les résultats obtenus ne représenteront pas un système fonctionnel réel ou du moins plausible.

II.3.3. Les différentes étapes de la simulation

Pour effectuer le dimensionnement avec le logiciel HOMER, on peut simplement entrer une série de données et le logiciel donne la solution optimale parmi les données soumises (figure 16). Ce n'est pas forcément la solution optimale absolue, mais plutôt la solution optimale parmi les choix soumis.

Dans cette partie, nous allons décrire les différentes étapes de notre travail.

La démarche globale est logique et élémentaire :

1. Évaluer la demande énergétique (consommation d'énergie) ;
2. Identifier les équipements nécessaires pour le système (panneaux solaires, convertisseur, batteries...) dans le logiciel HOMER ;
3. Entrer les données nécessaires dans le logiciel :
 - a. Consommation énergétique ;

- b. Gisements solaire et éolien pour le lieu désiré ;
- c. Equipements (prix des équipements et coût d'opération et d'entretien) ;
- 4. Lancer le calcul dans HOMER ;
- 5. Optimiser les résultats de HOMER de façon itérative pour arriver à la solution optimale pour ce système;

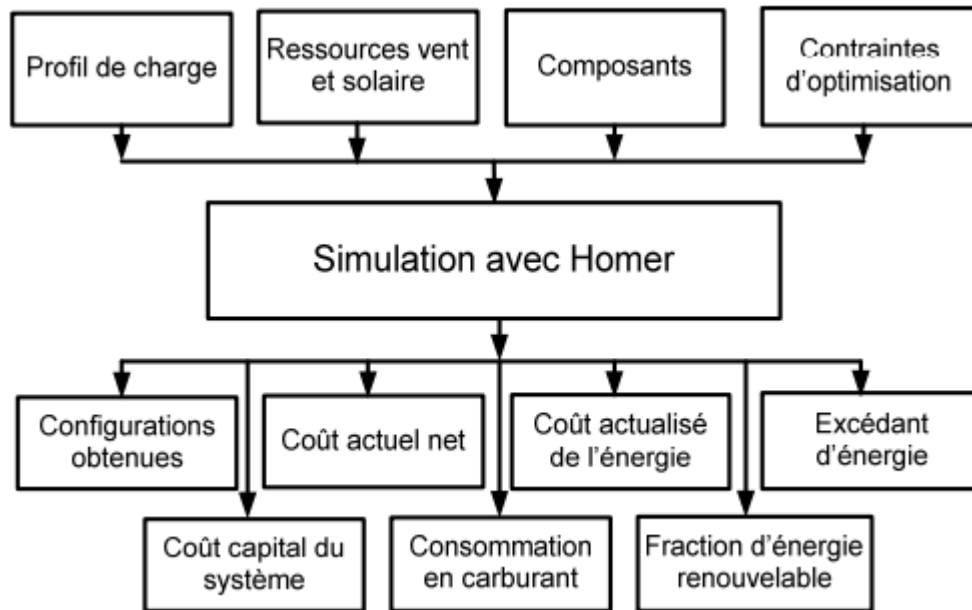


Figure 17 : Principe de fonctionnement du logiciel HOMER

Ce chapitre présente les données et la méthodologie utilisées dans ce mémoire. L'évaluation des potentiels solaire et éolien a été étudiée. La présentation des différentes applications a été également établie. Enfin, le logiciel de dimensionnement HOMER a été présenté. Dans la suite, nous allons présenter les solutions proposées et les comparer pour en déterminer les plus intéressantes. L'impact environnemental des solutions optimales sera aussi évalué.

Chapitre III : Etudes comparative et d'impact environnemental des solutions

Dans cette partie nous allons présenter un ensemble de systèmes énergétiques pour répondre aux besoins de toutes les applications sur chaque site. Une étude comparative des différentes configurations (PV + Batteries, Eolienne + Batteries, et PV + Eolienne + Batteries) est réalisée pour déterminer pour chaque application la solution optimale. Enfin, l'impact des solutions optimales sur le plan environnemental sera mené.

III.1 Etude comparative des solutions

III.1.1. Présentation des différentes configurations

Des solutions ont été proposées selon trois configurations pour chaque application considérée et sur chaque site :

- PV + Batteries : Dans ce cas, le générateur photovoltaïque assure la totalité de la production d'énergie (figure22). Ensuite l'excédent d'énergie produite au cours de la journée sera stocké au niveau des accumulateurs (batteries). Cette énergie stockée sera ensuite restituée lorsque le générateur ne peut plus en produire.

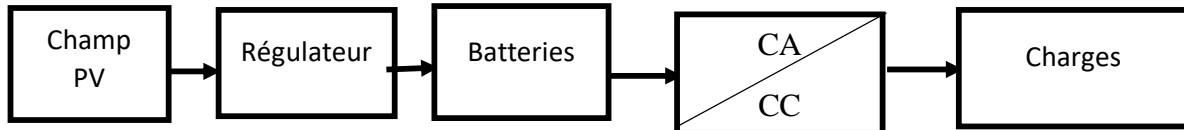


Figure 18 : Schéma d'une installation solaire

- Eolienne + batteries : A l'instar de la configuration PV, le générateur éolien assure la totalité de la production d'énergie (figure 23).

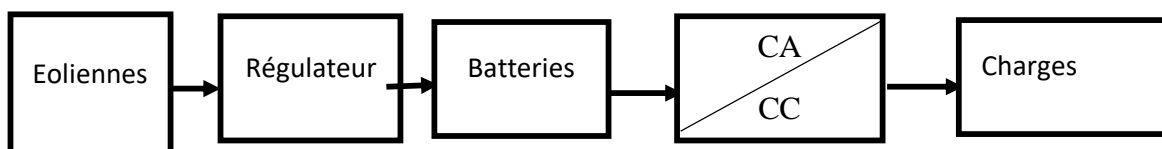


Figure 19 : Schéma d'une installation éolienne

- PV + éolienne + Batteries : Dans notre cas précis, on s'intéresse aux systèmes de petites puissances qui regroupent deux parties à savoir l'éolienne et les panneaux solaires (figure 24). Ces deux sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique, et produisent du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur autonome dans le circuit. En couplant ces

systèmes et en les associant à un dispositif de stockage de l'énergie, nous aurons alors les avantages suivants :

- Exploitation du système sans interruption ;
- Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système ;
- Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques.

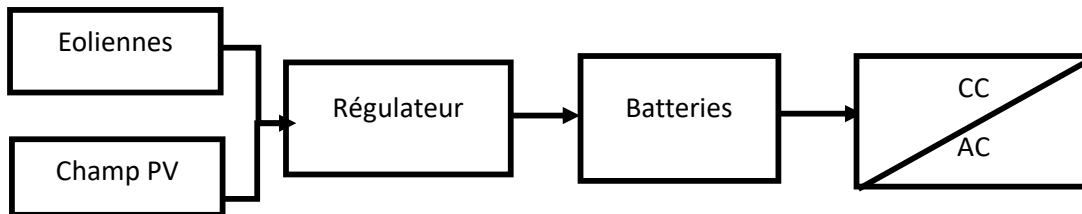


Figure 20 : Schéma d'une installation hybride (solaire + éolien)

III.1.2. Solutions globales

HOMER simule les configurations du système avec toutes les combinaisons possibles des composants spécifiés, il élimine toutes les configurations de systèmes infaisables, qui ne sont pas en adéquation avec la demande en électricité ou qui ne sont pas compatibles avec les ressources et les contraintes spécifiées. Les résultats obtenus avec HOMER pour les différentes applications selon les divers sites sont présentés dans les tableaux 9 à 13. Ces solutions optimisées ont été obtenues par ajustement des paramètres tels que la capacité maximale annuelle en pénurie, la réserve de fonctionnement pour la charge de pointe et la réserve d'exploitation pour la charge horaire. Les paramètres étudiés pour chaque type de système sont : coût d'investissement total, prix de revient de l'énergie et les émissions de CO₂ évitées. Pour chaque solution, on donne : la puissance crête du champ photovoltaïque, le nombre d'éoliennes, la capacité des batteries et la puissance du convertisseur. On constate que pour les sites de Ziguinchor (tableau 9), Sakhor (tableau 11), Gandon (tableau 12) et Kayar (tableau 13) les trois configurations sont réalisables. Par contre pour le site de Kaolack (tableau 10), la configuration Eolienne + batteries est techniquement irréalisable. Le faible potentiel éolien sur ce site pourrait en être la cause.

Tableau 6 : Présentation des solutions pour le site de Ziguinchor

Applications	Configurations solutions	Solutions	Cout de revient de l'énergie (FCFA)	Cout de l'investissement (FCFA)	Emissions évitées en t E.C02 /an
Ecole et case de Sante	PV + Batteries	2kWPV+400Ah+convertisseur 1 kW	167,496	4 157 408	6,052
	Eolienne + Batteries	3turbines+400 Ah+convertisseur 1 kW	347,606	8 997 418	6,313
	PV+éolien + Batteries	1kWPV+1turbine+400Ah+convertisseur1kW	206,344	5 291 154	6,253
Pompage	PV + Batteries	2kWPV+800Ah+convertisseur 1 kW	191,609	5 013 148	6,380
	Eolienne + Batteries	3 turbines+400 Ah+convertisseur 1 kW	339,206	8 997 418	6,469
	PV+éolien + Batteries	1kWPV+1turbine+800Ah+convertisseur1kW	232,467	6 146 895	6,448
Elevage	PV + Batteries	3kWPV+800Ah+convertisseur 1 kW	169,043	6 451 919	9,306
	Eolienne + Batteries	4 turbines+800 Ah+convertisseur 1 kW	309,252	12 425 674	9,798
	PV+éolien + Batteries	2kWPV+1turbine+400Ah+convertisseur1kW	176,006	6 729 925	9,325
Système multifonction	PV + Batteries	4kW PV+1200 Ah+convertisseur 2kW	179, 276	9 170 557	12,475
	Eolienne + Batteries	6 turbines+800 Ah+convertisseur 1 kW	342,076	17 570 712	12,527
	PV + éolien + Batteries	3kWPV+1turbine+800Ah+convertisseur 2 kW	183,186	9 448 563	12,579

Tableau 7 : Présentation des solutions pour le site de Kaolack

Applications	Configurations solutions	Solutions	Cout de revient de l'énergie (cfa)	Cout de l'investissement(FCFA)	Emissions évitées en t E.C02 /an
Ecole et case de Sante	PV + Batteries	2kWPV+800Ah+ 1kW convertisseur	184,120	5 013 148	6,641
	PV+éolien+Batteries	2kWPV+1turbine+800Ah+convertisseur1kW	244,294	7 446 109	7,432
Pompage	PV + Batteries	2kW PV+800Ah+1 kW convertisseur	183,209	5 013 148	6,672
	PV+éolien+ Batteries	2 kWPV+1 turbine+800Ah+convertisseur1 kW	236,530	7 446 109	7,677
Elevage	PV + Batteries	3kW PV+800Ah+Convertisseur 1Kw	160,,474	6 451 919	9,804
	PV+éolien+ Batteries	3kWPV+1 turbine+800 Ah+convertisseur 1 kW	196,465	8 884 883	11,030
Système multifonction	PV + Batteries	4 kW PV+800Ah+Convertisseur 2 kW	161,755	8 352 374	12,592
	PV+éolien +Batteries	3,5kWPV+1turbine+800Ah+convertisseur2 kW	188,706	10 028 392	12,959

Tableau 8 : Présentation des solutions pour le site de Sakhor

Applications	Configurations solutions	Solutions	Cout de revient de l'énergie (fcfa)	Cout investissement(FCFA)	Emissions évitées en t E.C02 /an
Ecole et case de Sante	PV + Batteries	3kWPV+800Ah+convertisseur 1 kW	214,659	6 861 555	7,789
	Eolienne + Batteries	3turbines+800Ah+convertisseur 1 kW	323,309	9 434 486	7,268
	PV + éolien + Batteries	1kWPV+1turbine+800Ah+convertisseur1kW	213,958	6 143 882	7,003
Pompage	PV + Batteries	2kWPV+1200Ah+convertisseur 1 kW	220,757	6 141 978	6,784
	Eolienne + Batteries	2turbines+1200 Ah+convertisseur 1 kW	281,732	7 857 266	6,802
	PV + éolien + Batteries	1kWPV+1turbine+400Ah,convertisseur 1kW	184,576	5 288 141	6,987
Elevage	PV + Batteries	4kWPV+800Ah+convertisseur 1 kW	186,759	8 682 762	11,329
	Eolienne + Batteries	4 turbines+800 Ah+convertisseur 1Kw	266,533	11 867 448	10,858
	PV + éolien + Batteries	2kWPV+1turbine+800Ah+convertisseur1kW	176,198	7 719 199	10,684
Système multifonction	PV + Batteries	4kW PV+1600 Ah+Convertisseur2 kW	191,939	10 572 476	13,433
	Eolienne + Batteries	5 turbines+800 Ah+convertisseur 1 kW	263,949	14 300 407	13,212
	PV + éolien + Batteries	2kWPV+2turbine+800Ah+convertisseur1kW	185,912	10 152 156	13,318

Tableau 9 : Présentation des solutions pour le site de Gandon

Applications	Configurations solutions	Solutions	Cout revient énergie	Cout de l'investissement(FCFA)	Emissions évitées en t E.C02 /an
Ecole et case de Sante	PV+ Batteries	3 kW PV+400 Ah+convertisseur1Kw	191,722	5 709 438	7,263
	Eolienne+Batteries	2 turbines+400 Ah+convertisseur 1 kW	219,090	6 145 785	7,58
	PV+éolien+Batteries	1 kW PV, 1 turbine,400Ah, convertisseur1Kw	178,313	5 151 596	7,044
Pompage	PV + Batteries	3kWPV+800Ah+convertisseur 1 kW	196,606	6 451 919	8,002
	Eolienne+ Batteries	2 turbines+800 Ah+convertisseur 1 kW	233,918	7 001 527	7,299
	PV+éolien+Batteries	1kWPV+1turbine+400Ah+convertisseur1Kw	175,140	5 151 596	7,172
Elevage	PV + Batteries	4kWPV+800Ah+convertisseur 1 kW	180,348	8 053 548	11,043
	Eolienne + Batteries	3turbines+800 Ah+convertisseur 1Kw	212,338	9 434 486	10,835
	PV+éolien+Batteries	2kWPV+1turbine+800 Ah+convertisseur2Kw	177,836	7 870 233	10,642
Système multifonction	PV + Batteries	5kW PV+800Ah+Convertisseur2 kW	176,719	9 926 235	13,698
	Eolienne + Batteries	4 turbines+800 Ah+ convertisseur 1 kW	211,918	11 867 448	13,657
	PV+éolien+Batteries	4kWPV+1turbine+800Ah+convertisseur2Kw	167,676	9 309 006	13,539

Tableau 10 : Présentation des solutions pour le site de Kayar

Applications	Configurations solutions	Solutions	Cout de revient de l'énergie (fcfa)	Cout de l'investissement(fcfa)	Emissions évitées en t.E.CO2 /an
Ecole et case de Sante	PV + Batteries	2,5 kW PV+400 Ah+ convertisseur1Kw	185,803	5 310 689	6,971
	Eolienne+Batteries	2 turbines+ 400 Ah+convertisseur 1 kW	227,549	6 145 785	6,586
	PV+éolien+Batteries	1kWPV+1turbine+800Ah+convertisseur 1kW	184,908	5 288 141	6,974
Pompage	PV + Batteries	2,5kWPV+400Ah+convertisseur 1 kW	182,277	5 329 410	7,130
	Eolienne + Batteries	3turbines+400 Ah+convertisseur 1 kW	268,341	7 857 266	7,141
	PV+éolien+Batteries	1kWPV+1turbine+400Ah+convertisseur1kW	181,528	5 288 141	7,104
Elevage	PV + Batteries	4kWPV+1200Ah+convertisseur 1 kW	195,515	9 292 613	11,590
	Eolienne + Batteries	3turbines+1200 Ah+ convertisseur 1Kw	235,395	10 290 226	10,661
	PV+éolien+Batteries	2kWPV+1turbine+1200Ah+convertisseur1kW	194,564	8 574 939	10,749
Système multifonction	PV + Batteries	6kW PV+1200 Ah+ Convertisseur2 kW	207,453	12 867 371	15,125
	Eolienne + Batteries	5 turbines+1200 Ah+convertisseur 1 kW	254,385	15 156 149	14,529
	PV+éolien+Batteries	2kW PV+ 2turbine+1200Ah+convertisseur 2kW	197,053	11 432 025	14,149

III.1.3. Comparaison des solutions globales

Le critère de choix pour comparer ces solutions est le prix de revient de l'énergie. En effet, le prix de revient de l'énergie est un facteur clé pour déterminer la meilleure solution sans tenir compte du volet environnement. Il est souvent pris comme indicateur du prix auquel l'électricité doit être vendue pour atteindre le seuil de rentabilité sur la durée de vie du projet. Les résultats de simulation montrent que la configuration PV + Batteries est beaucoup plus avantageuse pour les sites de Ziguinchor et de Kaolack (voir Figure 25). Contrairement aux études menées par C. Mouhamed [20] dans les zones de Sakhor, Gandon et Potou où le système PV/éolienne/batteries est jugé plus intéressant sur le plan économique par rapport au système PV/batteries. Le potentiel éolien fourni par les données satellitaires est faible, 3m/s à Kaolack et 3,8 m/s à Ziguinchor en moyenne annuelle. En effet, le faible potentiel éolien fourni par les données satellitaires, a impacté négativement les coûts du système PV/éolienne/batteries sur ces sites. La configuration PV + Eolienne +batteries présente les meilleures solutions pour les sites de Kayar, Sakhor, et Gandon identiquement aux études menées par C. Mouhamed [20] dans les zones de Sakhor, Gandon, Potou. Cela pourrait être dû au potentiel solaire et éolienne intéressant dans ces sites.

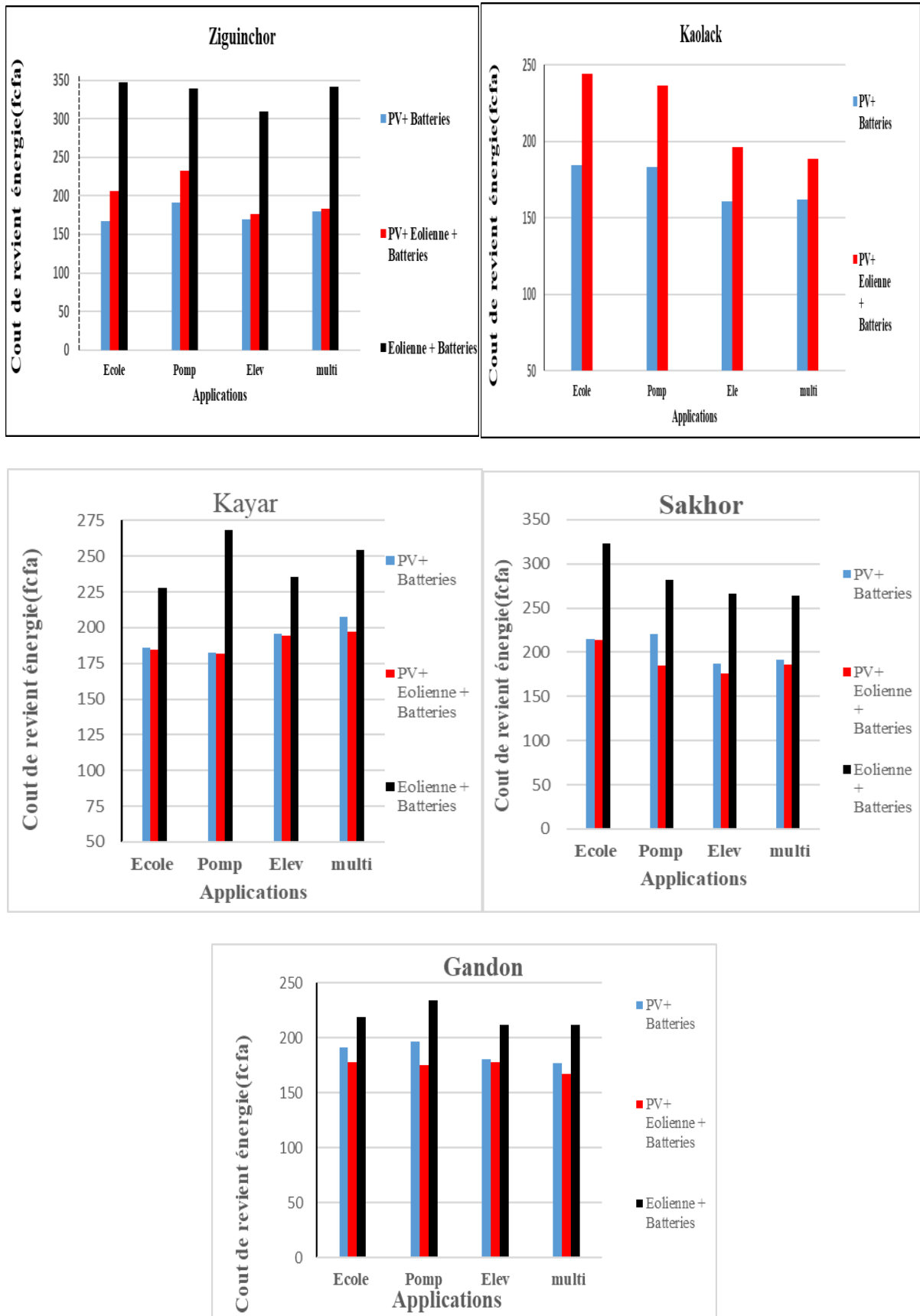


Figure 21 : Comparaison des solutions en terme de coût de revient de l'énergie

III.1.4. Solutions optimales

Les solutions optimales, sont les solutions ayant les coûts de revient de l'énergie les moins importantes trouvées précédemment. Elles sont présentées dans le tableau 14. Les paramètres étudiés pour chaque type de système sont : coût d'investissement total, prix de revient de l'énergie et les émissions de CO₂ évitées. Pour les sites de Ziguinchor et de Kaolack, les solutions optimales sont de configurations PV/Eolienne/Batteries. Tandis que pour Sakhor, Gandon et Kayar, leurs solutions optimales sont de configurations PV/Eolienne/Batteries. Dans la suite du travail, nous allons comparer les différentes solutions optimales en fonction de trois critères : la puissance installée(KWc), la capacité de stockage(Ah) et le coût de revient de l'énergie. Cela permettra de déterminer pour chaque application, le site le plus intéressant.

Tableau 11 : Présentation des solutions optimales

Ziguinchor					Kaolack				
Solutions	Cout revient énergie(fcfa)	Cout investissement(fcfa)	Emissions t.E.CO2/an	Applications	Solutions	Cout revient énergie(fcfa)	Cout investissement(fcfa)	Emissions t.E.CO2/an	
Applications									
Ecole et case santé	2kWpV+400Ah+ convertisseur 1 kW	167,496	4 157 408	6,052	Ecole et case santé	2kWpV+800Ah+ convertisseur 1 kW	184,120	5 013 148	6,641
Pompage	2kWpV+800Ah+ convertisseur 1 kW	191,609	5 013 148	6,380	Pompage	2kWpV+800Ah+ convertisseur 1 kW	183,209	5 013 148	6,672
Elevage	3kWpV+800Ah+ convertisseur 1 kW	169,043	6 451 919	9,306	Elevage	3kWpV+800Ah+ convertisseur 1 kW	160,474	6 451 919	9,804
Système multifonction	4kWpV+1200 Ah+convertisseur 2kW	179, 276	9 170 557	12,475	Système multifonction	4kWpV+800 Ah+convertisseur 2kW	161,755	8 352 374	12,592

Kayar					Sakhor				
Solutions	Cout revient énergie(fcfa)	Cout investissement(fcfa)	Emissions t.E.CO2/an	Applications	Solutions	Cout revient énergie(fcfa)	Cout investissement(fcfa)	Emissions t.E.CO2/an	
Applications									
Ecole et case santé	1kWpV+1turbine+800Ah+ convertisseur 1 kW	184,908	5 288 141	6,974	Ecole et case santé	1kWpV+1turbine+800Ah+ convertisseur 1 kW	213,958	6 143 882	7,003
Pompage	1kWpV+1turbine+400Ah+ convertisseur 1 kW	181,528	5 288 141	7,104	Pompage	1kWpV+1turbine+400Ah+ convertisseur 1 kW	184,576	5 288 141	6,987
Elevage	2kWpV+1turbine+1200Ah+ convertisseur 1 kW	194,564	8 574 939	10,749	Elevage	2kWpV+1turbine+800Ah+ convertisseur 1 kW	176,198	7 719 199	10,684
Système multifonction	2kWpV+2turbines+1200 Ah+convertisseur 2kW	197,053	11 432 025	14,149	Système multifonction	2kWpV+2turbine+800 Ah+convertisseur 1kW	185,912	10 152 156	13,318

Gandon	Solutions	Coût revient énergie(fcfa)	Coût investissement(fcfa)	Emissions t.E.CO2/an
Applications				
Ecole et case santé	1kWpV+1turbine+400Ah+ convertisseur 1 kW	178,313	5 151 596	7,044
Pompage	1kWpV+1turbine+400Ah+ convertisseur 1 kW	175,140	5 151 596	7,172
Élevage	2kWpV+1turbine+800Ah+ convertisseur 2kW	177,836	7 870 233	10,642
Système multifonction	4kWpV+1turbine+800Ah+convertisseur 2kW	167,676	9 309 006	13,539

III.1.5. Comparaison des solutions optimales

Dans cette partie, nous allons comparer les solutions optimales en fonction des critères suivants : la puissance totale du système, la capacité de stockage(Ah) et le coût de revient de l'énergie(fcfa).

La figure 26 compare les différentes solutions optimales en fonction de la puissance totale du système. La puissance totale du système est la taille de l'installation. Pour les applications « école et case de santé », « pompage » et « élevage », la puissance des systèmes est moins importante sur les sites de Kayar, Sakhor et Gandon. L'installation des différents systèmes nécessitera moins d'espace sur ces sites. Concernant l'application « système multifonction », nous remarquons que la puissance totale du système est moins élevée sur les sites de Kayar et Sakhor. Pour ces derniers également, leurs solutions optimales occuperont moins d'espace sur l'installation.

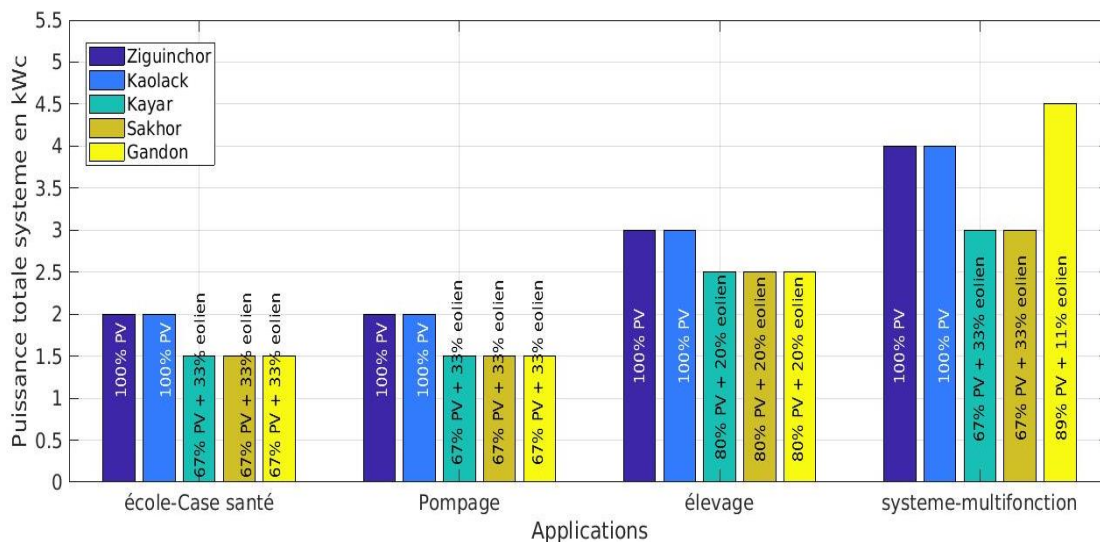


Figure 22 : Comparaison des solutions optimales en fonction de la puissance totale du système

La figure 27 compare les solutions optimales en terme de capacité de stockage. Les sites de Ziguinchor et de Gandon sont plus intéressants pour l'application « école et case de santé ». Les sites de Kayar, Sakhor et Gandon sont plus avantageux concernant l'application « pompage ». Concernant l'application « élevage », le site de Kayar présente une capacité de stockage plus importante (moins avantageux). Enfin, les sites de Kaolack, Sakhor et Gandon sont plus intéressants pour l'application « système multifonction ». Le stockage est très important dans ces systèmes autonomes. Cependant, quand il devient trop important, ça pourrait impacter négativement sur les couts des systèmes.

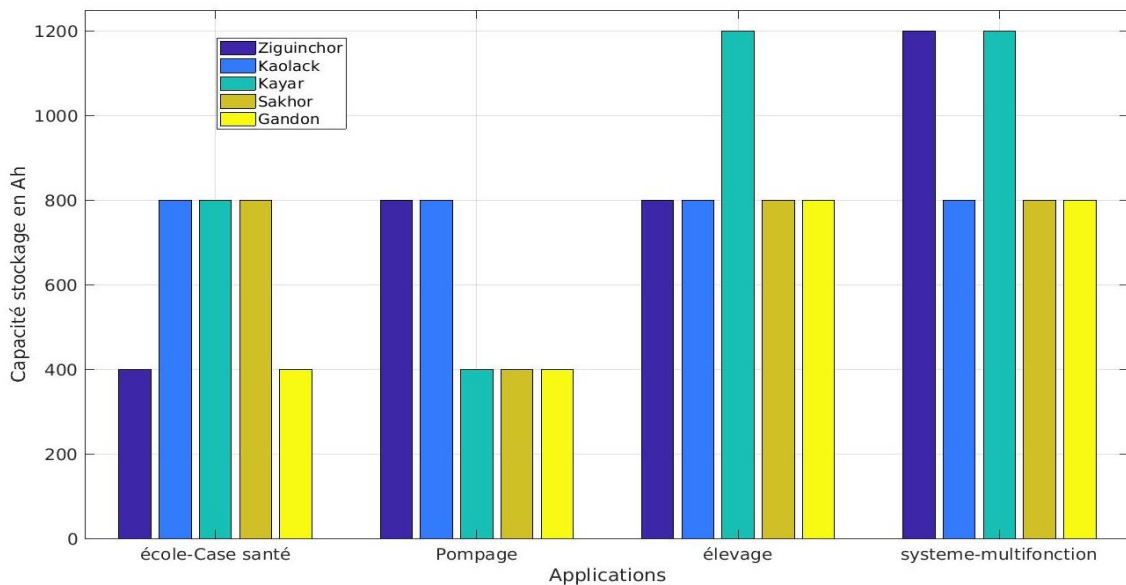


Figure 23 : Comparaison des solutions optimales en fonction de la capacité de stockage

La figure 28 compare les solutions optimales en terme de coût de revient de l'énergie(fcfa). Pour l'application « école et case de santé », le site de Ziguinchor est le plus intéressant avec un coût de revient de 167,196 FCFA. Le site de Kaolack est plus intéressant pour les applications « Elevage » et « système multifonction » avec respectivement des coûts de revient de 160,474 fcfa et 161,755 fcfa. Pour l'application « Pompage », le site de Gandon est plus intéressant avec un coût de revient de 167,676 fcfa. Les sites de Ziguinchor et de Kaolack ont des solutions de configuration PV + batteries. Les solutions du site de Gandon sont de configurations PV + éolienne + batteries. Le système PV+éolien+Batteries est moins avantageux du fait des coûts de maintenance et d'entretien importants de l'éolienne. Le système PV+Batteries nécessitent moins de maintenance et d'entretien. Le profil de consommation et le

gisement de la source d'énergie (solaire ou éolienne) peuvent aussi avoir une influence complexe sur le coût de revient de l'énergie en fcfa/kWh.

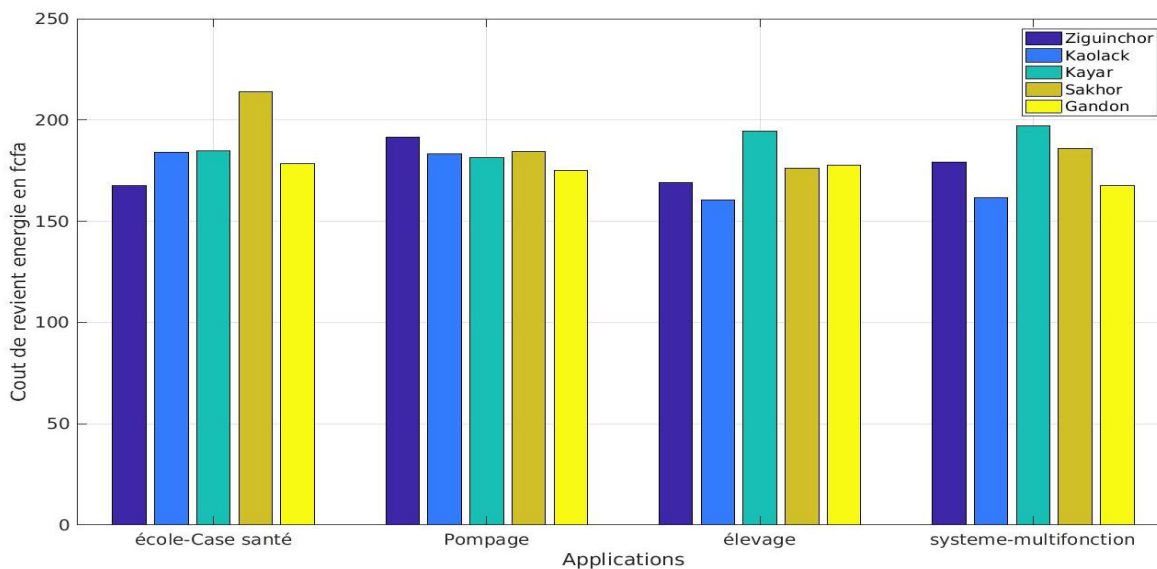


Figure 24 : Comparaison des solutions optimales en terme du coût de revient de l'énergie

III. 2 Etude d'impact environnemental des solutions optimales

III.2.1. La diminution des gaz à effet de serre : une nécessité, un atout

Le changement climatique est en cours et déjà sensible sur nos territoires. A plus long terme, l'augmentation des épisodes climatiques extrêmes (nombre et durée des vagues de chaleur, des sécheresses, des pluies fortes, ...) va avoir des conséquences directes ou indirectes sur la population, la santé humaine et animale, les activités économiques, la biodiversité, les paysages...L'augmentation des émissions des gaz à effet de serre (GES) liées aux activités humaines est la cause majeure de ce changement. La réduction de ces émissions est une nécessité pour limiter le plus possible le dérèglement climatique et ses conséquences.

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) [15], 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.

III.2.2 Bilan Carbone

La méthode du bilan carbone permet de comptabiliser les émissions, directes ou indirectes, de gaz à effet de serre d'une activité ou d'un site. Cette méthode développée par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) se base uniquement sur des données facilement accessibles.

C'est la première étape du diagnostic climat d'une activité ou d'un site. En hiérarchisant les différents postes d'émissions en fonction de leur importance, elle facilite la mise en place d'actions prioritaires de réduction de ces émissions. 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 [15].

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 sur chaque site, 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 (10) permet de calculer les émissions de GES [21].

$$\text{Emission (kg.E.C)} = \text{EEC (kWh)} \times \text{FEE (kg.E.C/kWh)} \quad (10)$$

EEC : Energie électrique consommée (kWh)

FEE : Facteur d'émission électrique (kg.E.C/kWh)

Le facteur d'émission électrique est obtenu par la relation (11)

$$FEE = \frac{\text{Emission annuelle}}{\text{Production annuelle d'énergie}} \quad (11)$$

Le facteur d'émission est évalué au Sénégal à 0,741 kg.E.C/kWh dans la littérature. Pour avoir la quantité émise en CO₂, il suffit de faire : 12 g de carbone représente 44 g de CO₂.

III.2.3. Bilan carbone des solutions optimales proposées

La figure 29 présente le bilan carbone des solutions optimales sur les cinq sites choisis. On constate que les applications « école et case de santé » et « pompage » réduisent plus les émissions que les applications « Elevage » et « système multifonction ». Cette différence est expliquée par le fait que les applications « Elevage » et « Système multifonction » ont une consommation d'énergie beaucoup plus importante.

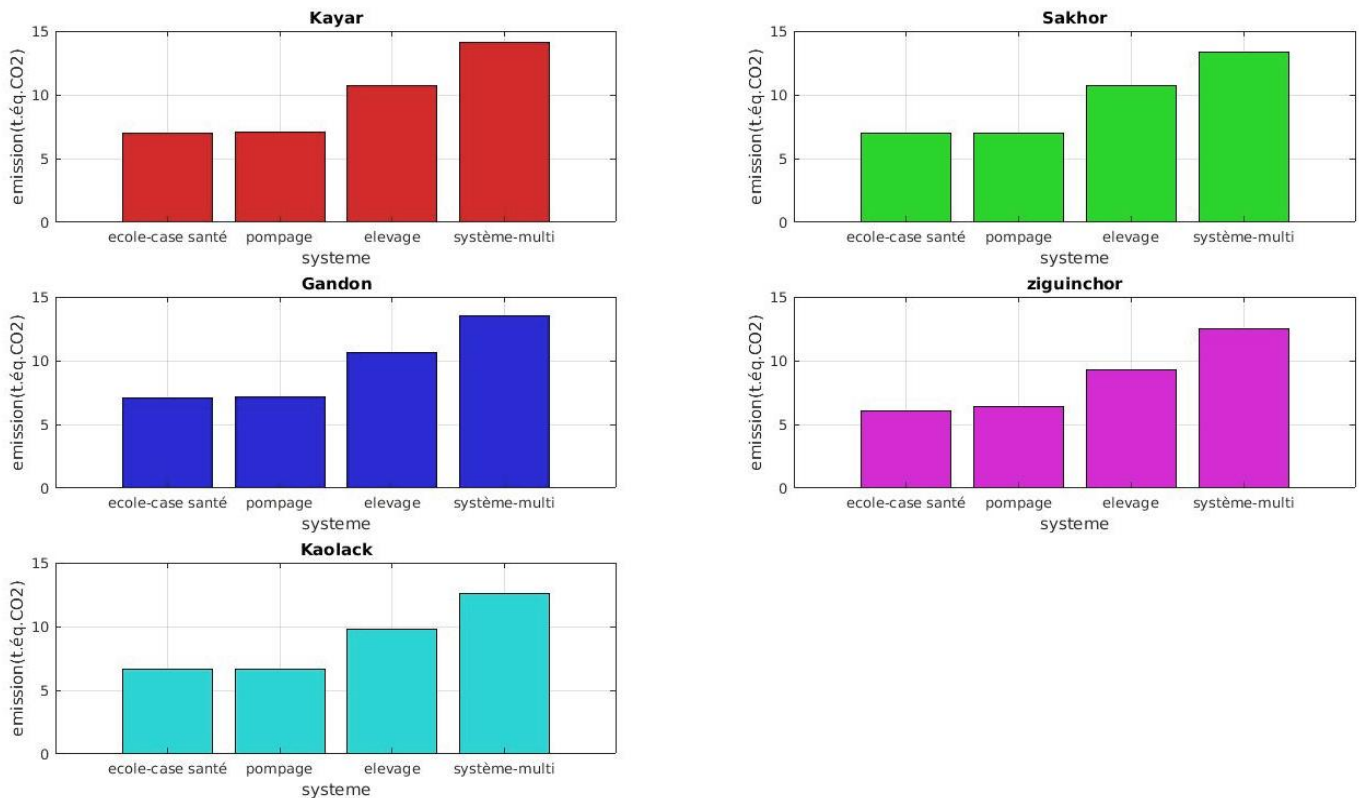


Figure 25 : Bilan carbone des solutions optimales

Le site de Kaolack permet de réduire une émission de 35,709 t.E. CO_2 /an, celui Ziguinchor réduit 34,213 t.E. CO_2 /an. Les sites de Sakhor, Kayar et Gandon réduisent respectivement les émissions de 37,992 t.E. CO_2 /an, 38,976 t.E. CO_2 /an et 38,397 t.E. CO_2 /an. L'ensemble des cinq sites permettent de réduire les émissions de 185,287 t.E. CO_2 /an, ce qui représente une diminution importante chaque année à la pollution atmosphérique. 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 économiques importantes pour l'ensemble de ces sites avec les mécanismes de développement propre (MDP).

Dans ce chapitre, une étude technico-économique et environnementale de tous les systèmes

proposés a été effectuée. La solution avec PV + batteries est plus intéressante pour les sites de Ziguinchor et de Kaolack. Pour les sites de Kayar, Gandon et Sakhor la solution avec PV+ éolienne+ batteries est plus intéressante. La comparaison des solutions optimales en terme de coût de revient de l'énergie, montre que les sites de Ziguinchor, Kaolack et Gandon sont les plus intéressants. Enfin, nous avons pu voir l'impact de ces solutions sur le plan environnemental. Les réductions de GES doivent être une priorité pour tous. Ces solutions permettent une réduction importante de GES.

Conclusion Générale

Ce travail contribuera à la protection de l'environnement pour lutter contre le changement climatique, mais aussi permettra à ces localités éloignées du réseau électrique d'être bien indépendantes en matière d'énergie électrique, cela facilitera leur développement socio-économique. Une étude technico-économique et environnementale de solutions à énergie renouvelable a été établie. Elle est consacrée à la mise en place de solutions d'énergies renouvelables (solaire photovoltaïque, éolien et solaire photovoltaïque + éolien) pour la production d'électricité sur cinq sites du Sénégal (Gandon, Kayar, Ziguinchor, Sakhor, Kaolack). Compte tenu de l'éloignement du réseau électrique de certaines zones et des coûts de raccordement qui y sont très élevés, l'intégration de systèmes d'énergies renouvelables autonomes serait une alternative pour répondre aux besoins en électricité de ces populations. Ces systèmes permettent aussi d'instaurer un environnement propice à la création d'activités rémunératrices ou d'activités permettant d'accroître le revenu. Ces systèmes contribueront d'autre part à préserver l'environnement des émissions des gaz à effet de serre d'origine fossile (SENELEC).

Le logiciel HOMER a été utilisé pour proposer trois types de solutions (PV/batteries, Eolienne/batteries et PV/Eolienne/batteries) pour chaque application considérée selon les différents sites. Les profils de charges des différentes applications ont été établis. Pour les sites, nous avons évalué leurs potentiels solaire et éolien. Les résultats obtenus sont analysés du point de vue économique et environnemental.

Sur le plan économique, les résultats ont montré que la configuration PV+ batteries est beaucoup plus intéressante pour les sites de Ziguinchor et Kaolack et la configuration PV + éolienne + batteries l'est pour les sites de Gandon, Sakhor et Kayar. Le site de Ziguinchor est plus favorable pour l'application école et case de santé. Le site de Kaolack est plus opportun pour les applications élevage et système et multifonction en terme de cout de revient de l'énergie. Enfin, pour l'application Pompage, c'est le site de Gandon qui offre le meilleur coût de revient de l'énergie.

Sur plan environnemental, les résultats montrent que les solutions optimales obtenues sur l'ensemble permettent d'éviter une émission de 185,287 t.E. CO₂/an. Enfin, il est important de développer un outil qui prend en compte ces résultats et qui aide les acteurs dans leurs décisions.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Perspective monde, source : Banque mondial : « <https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/tend/SEN/fr/EG.USE.ELEC.KH.PC.html> », date de consultation : 26/11/2020.
- [2] E. Maussion « Énergies renouvelables : comment expliquer le succès du Sénégal ? », journal jeune Afrique, 2020.
- [3] P. BLANC, B. ESPINAR, L. WALD, « La ressource solaire : importance et moyens de caractérisation » Article : DOI : 10.4000/books.editions-cnrs.11054, Janvier 2013, pp 6.
- [4] A. GUERIDI, « Dimensionnement d'un système hybride pour subvenir aux besoins de l'université de Chlef » Mémoire de magister, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, 2011, pp 108.
- [5] O. FEDDAOUI, « Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération » : Application aux Energies Renouvelables ; Mémoire de magister, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2014, pp 47.
- [6] : Mathieuco, « Fonctionnement d'un panneau solaire » Article : BCLT Energie, 26 mai 2017.
- [7] I. DAGNON, « Etude de faisabilité technico-économique d'une centrale électrique hybride hydroélectrique-solaire PV-stockage : cas de la localité de Farako au mali » Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur 2^{ie} avec grade de master option : génie électrique et énergétique, 2018, pp 70.
- [8] B. FLECHE, D. DELAGNES, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007, 103 p.
- [9] Le panneau solaire.net, « <https://www.lepanneausolaire.net/les-differentes-technologies-batteries.php> »
- [10] NRJ & Solaire, « https://nrjsolaires.com/products/regulateur-solaire?cmp_id=8700757804&adg_id=90189072609&kwd=%2Bregulateur%20%2Bsolaire&device=c&utm_campaign=S%20-%20Activity%20-%20nrjvente2020%20-%20-%20-%20-%20&utm_source=google&utm_medium=cpc&gclid=CjwKCAiA6aSABhApEiwA6Cbm__Xif0lZJ6fhCSjvAcG8w194--if9P-7fLP14A8Vv9tIpmRblwsuBxoCWkgQAvD_BwE »
- [11] Simple solaire, « <https://www.simple-et-solaire.com/victron/184-onduleur-solaire-victron-phoenix-800va.html> »

- [12] A. NDIAYE, « Energie Eolienne », Cours sur les systèmes d'énergies renouvelables photovoltaïques-éolien-hybrides(SAO5351), 2018-2019.
- [13] M. Q. QUANG, « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé » Thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'université de Reims Champagne-Ardenne, France, pp 107.
- [14] F. BILLEL, « Etude d'un système hybride (solaire-éolien) » Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de Master, 2015, pp 83.
- [15] M. NDOUR, « Analyse technico-économique et de l'impact environnemental de solutions d'énergies renouvelables pour l'université de Ziguinchor », Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de Master Académique, 2018, pp 49
- [16] B. FLECHE, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007, pp 103.
- [17] L. Stoyanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelable », 2011, pp 87
- [18] E. Sebaii, « Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia », Energies et application, 2010, pp 576.
- [19] V. Demeusy, « Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque / groupe électrogène », 2011, pp 24.
- [20] 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, pp 74.
- [21] Accord de Paris sur le changement climatique, « <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/climate-change/paris-agreement/#> », date de consultation : 29 Octobre 2020.
- [22] J. GRAVEL, « Analyse technico-économique d'un système hybride éolien photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls » mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences appliquées à l'école Polytechnique De Montréal, 2011, pp 198.

[23] PERACOD, « le guide des acteurs privés et publics des énergies renouvelables au Sénégal », 2011, pp 50.

[24] 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.

[25] 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, pp 82.

[26] 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.

[27] M. SORYA, « Dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter un habitat dans la wilaya d'Ouargla » Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de Master Académique, 2015, pp 49