



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN**

# MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER EN PHYSIQUE**

Spécialité : Physique Energétique & Energies Renouvelables

Par :

**Chakor Rania**

Sur le thème

---

## **Modélisation, simulation et analyse d'un Système de stockage hybride photovoltaïque-éolienne dans un site isolé**

---

Soutenu publiquement le dimanche 4 juillet 2021 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mme HADJOU BELAID Zakia	Docteur	Université de Tlemcen	Président
Mme KHERBOUCHE Djamila	Docteur	ESSA Tlemcen	Encadrant
Mr BEY Mohammed	Docteur	AMC Tipaza	Examinateur
Mr BIBI TRIKI Nasserredine	Professeur	Université de Tlemcen	Co-encadrant
Mme BOUKLI HACENE Souhila	Docteur	Université de Tlemcen	Examinatrice

*Année Universitaire : 2020 ~ 2021*

## **Remerciements**

*La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance. Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à Madame **KHERBOUCHE Djamila** l'encadreur de ce mémoire , pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*Au professeur **BIBI TRIKI Nasreddine** qui a déjà été mon enseignant durant mes années de master et le co-encadreur de ce mémoire.*

*Je désire aussi remercier le jury, Mesdames et Messieurs, qui m'ont honoré de leur présence et qui ont accepté d'examiner et de discuter mon mémoire de fin d'études.*

*Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes parents et ma petite familles spécialement a ma tante Fatima , a mes meilleures amis Bahi ,Asma et Ikram qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche .*

*A tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin , par un geste, une parole ou un conseil, je leur dis merci.*

## *Dédicaces*

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tous simplement que : Je dédie ce mémoire de master à :*

*A Ma tendre Mère :*

*Tu représente pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager.*

*Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*A Mon très cher Père :*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous.*

*Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.*

*Cette humble dédicace ne saurait exprimer mon grand respect et ma profonde estime. A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études. A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.*

## Résumé

Les systèmes d'énergie renouvelable hybrides (SERH) sont de plus en plus populaires pour les applications de production d'électricité dans les sites isolés en raison des progrès des technologies d'énergie renouvelable et de la hausse ultérieure des prix des produits pétroliers. Les aspects économiques de ces technologies sont suffisamment prometteurs pour les inclure dans le développement. Ce document se concentre sur les systèmes d'énergie hybrides basés sur les ressources solaires photovoltaïques (PV) et éoliennes. Qui met en lumière divers paramètres de faisabilité économique, des stratégies de dimensionnement et modélisation avec des avancées logiques pour améliorer leur utilisation, les perspectives d'avenir et leur organisation. Des stratégies pour développer un système de stockage efficace sont également présentées ici, ainsi qu'un bref aperçu des développements des techniques d'optimisation, de l'indice de fiabilité et des techniques d'analyse des coûts des systèmes hybrides d'énergie renouvelable à l'aide d'une simulation avec le logiciel **HOMER Pro**. Le système énergétique optimal comprend des modules PV de 0,145 kW, une éolienne (1 kW), un convertisseur de 25 kW et un nombre de 8 batteries.

**Mots clé :** Systèmes hybrides – Site isolé – Solaire photovoltaïque (PV) – Eoliennes – Système de stockage – Modélisation – Logiciel HOMER Pro.

## Abstract

Hybrid Renewable Energy Systems (HRES) are increasingly popular for power generation applications in remote sites due to advancements in renewable energy technologies and subsequent rising prices of petroleum products. The economics of these technologies are promising enough to include them in development. This paper focuses on hybrid energy systems based on solar photovoltaic (PV) and wind resources. Which sheds light on various parameters of economic feasibility, sizing and modeling strategies with logical advances to improve their use, future prospects and their organization. Strategies for developing an efficient storage system are also presented here, along with a brief overview of developments in optimization techniques, reliability index and cost analysis techniques of hybrid renewable energy systems at using a simulation with **HOMER Pro** software. The optimal energy system consists of 0.145 kW PV modules, a wind turbine (1 kW), a 25 kW converter and a number of 8 batteries.

**Keywords :** Hybrid systems - Isolated site - Solar photovoltaic (PV) - Wind turbines - Storage system - Modeling - HOMER Pro software.

## ملخص

تحظى أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة بشعبية متزايدة لتطبيقات توليد الطاقة في المواقع النائية بسبب التقدم في تقنيات الطاقة المتجددة وما أعقب ذلك من ارتفاع أسعار المنتجات البترولية. إن اقتصاديات هذه التقنيات واعدة بما يكفي لإدراجها في التنمية. تركز هذه الورقة على أنظمة الطاقة الهجينة القائمة على الطاقة الشمسية الكهروضوئية وموارد الرياح. وهو ما يلقي الضوء على مختلف معايير الجدوى الاقتصادية واستراتيجيات التحجيم والنمذجة مع التطورات المنطقية لتحسين استخدامها وآفاق المستقبل وتنظيمها. كما يتم هنا تقديم إستراتيجيات لتطوير نظام تخزين فعال ، إلى جانب نظرة عامة موجزة عن التطورات في تقنيات التحسين ، ومؤشر الموثوقية وتقنيات تحليل التكلفة لأنظمة الطاقة المتجددة الهجينة عند استخدام محاكاة مع برنامج HOMER Pro.

يتكون نظام الطاقة الأمثل من 0.145 كيلوواط من الوحدات الكهروضوئية ، وتوربينات الرياح (1 كيلوواط) ، ومحول 25 كيلو واط وعدد من 8 بطاريات

## الكلمات المفتاحية :

الأنظمة الهجينة - الموقع المعزول - الطاقة الشمسية الكهروضوئية - توربينات الرياح - نظام التخزين - النمذجة - برنامج Homer Pro.

## Problématique

Le domaine scientifique des énergies renouvelables est d'actualité, d'un intérêt certain et stratégique pour le développement national. La sélection d'un site favorable, parmi les nombreux sites venteux en Algérie, pour abriter éventuellement un projet énergétique hybride éolien-photovoltaïque. L'étude et la caractérisation du type d'accumulateurs énergétique, et la conception d'un système hybride de stockage énergétique, répondant aux performances d'optimalité et de longévité. Ceci, permet d'améliorer les performances techniques du stockage énergétique et technico- économiques du système hybride. Notre étude porte sur la problématique de la gestion de charge multi-sources dans un système de production d'énergie hybride, photovoltaïque / éolien, associé à un système de stockage. L'objectif est de trouver une stratégie de gestion des échanges d'énergie entre les différents éléments du système hybride.

**Mots Clés :** Energies, photovoltaïque, éolienne, Accumulateurs d'énergie, stockage énergétique, énergies renouvelables, modélisation, simulation.

## *Sommaire*

<i>Remerciments</i> .....	
<i>Dédicaces</i> .....	
Résumé .....	
Problématique .....	
Introduction Générale .....	1

### **Chapitre I**

#### **Etat de l'art sur les énergies renouvelables et systèmes d'alimentation électriques**

Introduction .....	4
<b>I. Généralités sur les énergies renouvelables .....</b>	<b>4</b>
I.1 Les énergies renouvelables .....	4
I.2 Les différents types des énergies renouvelables .....	5
I.2.1 Énergie solaire .....	5
I.2.2 La géothermie .....	6
I.2.3 Énergie hydraulique .....	6
I.2.4 Les énergies marines ( houlomotrice ) .....	7
I.2.5 La biomasse .....	7
I.3 Les avantages et inconvénients des énergies renouvelables .....	8
I.4 Energie photovoltaïque .....	9
I.4.1 Description générale des modules photovoltaïque .....	9
I.4.2 Technologie photovoltaïque .....	10
I.4.3 Les différents systèmes photovoltaïques .....	11
I.4.4 Performances & caractéristiques électriques courant-tension .....	16
I.4.5 Câblage des modules solaires .....	18
I.5 Energie éolienne .....	19
I.5.1 Eoliennes à axe vertical .....	19
I.5.2 Eoliennes à axe horizontal .....	21

I.5.3	Principe de fonctionnement .....	21
I.5.4	Architecture d'une éolienne .....	22
<b>Conclusion.....</b>		<b>24</b>
<b>Bibliographie .....</b>		<b>25</b>

## Chapitre II

### Les systèmes hybrides photovoltaïque-éolienne dans un site isolé

Introduction .....	28
<b>II. Système hybride (SEH) .....</b>	<b>28</b>
II.1 Mission des systèmes d'énergie hybrides.....	29
II.2 Composants du système hybride .....	30
II.2.1 Sources d'énergie renouvelable .....	30
II.2.2 Systèmes de stockage .....	30
II.2.3 Système de supervision .....	30
II.2.4 Convertisseurs .....	31
II.2.5 Les charges .....	31
II.3 Architecture des systèmes hybride .....	31
II.3.1 Architecture à bus à CC .....	32
II.3.2 Architecture à bus à CA .....	32
II.3.3 Architecture mixte à bus à courant continu (CC)/courant alternatif(CA) .....	33
II.4 Les différentes combinaisons des systèmes hybrides .....	33
II.4.1 Système hybride photovoltaïque –éolienne-diesel .....	33
II.4.2 Système hybride photovoltaïque-batterie et piles à combustible .....	34
II.4.3 Système hybride photovoltaïque –éolienne.....	34
II.5 Avantages et inconvénients d'un système hybride.....	35
II.6 Description du système hybrides photovoltaïque-éolienne .....	35
II.6.1 Fonctionnement.....	35
II.6.2 Principaux composantes du système PV-éolien.....	36
II.7 Description du principe d'un système de stockage d'énergie .....	37
II.7.1 Les différents technologies de stockage de l'énergie électrique .....	38
II.7.2 Hybridation des unités de stockage en site isolé .....	42
II.7.3 Choix de Système de puissance hybride et de stockage.....	43
II.8 Choix du type de bus couplage mixte CC/AC.....	43

II.8.1	Choix des convertisseurs de puissance.....	44
II.9	Stratégies de commande des sources.....	44
II.9.1	Algorithmes MPPT pour panneaux photovoltaïques .....	44
II.9.2	Algorithmes MPPT pour éoliennes .....	45
II.9.3	Commande des unités de stockage.....	45
<b>Conclusion.....</b>		<b>46</b>
<b>Bibliographie .....</b>		<b>47</b>

## Chapitre III

### Modélisation du système hybride photovoltaïque-éolienne

<b>Introduction.....</b>	<b>50</b>	
<b>III. Modélisation du générateur photovoltaïque.....</b>	<b>50</b>	
III.1	Energie électrique produite par le générateur photovoltaïque.....	50
III.2	Efficacité d'un générateur photovoltaïque .....	50
III.3	Modèle de la température de la cellule .....	51
III.3.1	Modèle électrique de la cellule PV .....	52
III.4	Modélisation du générateur éolien .....	54
III.4.1	Modèle du vent.....	54
III.4.2	Energie cinétique du vent.....	54
III.4.3	Limite de Betz/Formule de Betz .....	55
III.4.4	Puissance éolienne incidente du vent.....	55
III.4.5	Rendement aérodynamique de l'éolienne .....	57
III.4.6	Couple développé sur le rotor de l'éolienne.....	57
III.5	Fonction de probabilité de densité de Weibull .....	58
III.6	Distribution de Rayleigh.....	58
III.7	Loi de Davenport et Harris .....	59
III.8	Modélisation d'un système de stockage ( Batteries ) .....	60
III.8.1	Caractéristiques de la batterie .....	60
III.9	Modèle électrique de CIEMAT .....	61
III.9.1	Modélisation de la capacité $C_{bat}$ .....	61
III.9.2	Tension de batterie en régime de décharge .....	62
III.9.3	Tension de batterie en régime de charge .....	63



III.9.4	Tension de batterie en régime de surcharge .....	63
III.9.5	Modélisation du rendement faradique .....	64
III.9.6	Modélisation du système hybride (photovoltaïque-éolien) .....	64
III.9.7	Capacité du système de stockage .....	65
<b>Conclusion.....</b>		<b>65</b>
<b>Bibliographie.....</b>		<b>66</b>

## **Chapitre IV**

### **Simulation du système hybride photovoltaïque-éolienne**

<b>Introduction .....</b>		<b>67</b>
<b>IV. Présentation du Logiciel Homer Pro.....</b>		<b>67</b>
IV.1	Géographie et climat Description du cas étudié .....	68
IV.1.1	Profil de charge .....	70
IV.2	Évaluation des ressources et collecte de données .....	71
IV.2.1	Données sur les ressources solaires .....	71
IV.2.2	Données sur les ressources éoliennes .....	72
IV.2.3	Température ambiante .....	73
IV.3	Modélisation des composants du système hybride .....	75
IV.3.1	Modélisation de panneaux solaires photovoltaïques .....	75
IV.3.2	Convertisseur .....	76
IV.3.3	Modélisation d'éoliennes .....	76
IV.3.4	Modélisation de la batterie .....	78
IV.4	Résultats de la simulation et discussions .....	79
IV.4.1	Performances du banc de batteries .....	81
IV.4.2	Résultats de l'optimisation du système hybride PV-éolien .....	82
<b>Conclusion.....</b>		<b>84</b>
<b>Bibliographies.....</b>		<b>85</b>
<b>Conclusion générale .....</b>		<b>86</b>

## Liste des figures

Figure IV- 1 Les trois capacités de base de Homer Pro .....	68
Figure IV- 2 Carte de la Wilaya de Tlemcen et de la zone de zenata, Algérie .....	69
Figure IV- 3 Écran d'accueil HOMER Pro x64 3.14.2.....	70
Figure IV- 4 Charge primaire importée dans HOMER Pro .....	71
Figure IV- 5 Profil de charge annuel.....	71
Figure IV- 6 Rayonnement quotidien de Tlemcen région de Zenata.....	72
Figure IV- 7 Vitesse moyenne mensuelle du vent reçue.....	73
Figure IV- 8 Profil de vitesse du vent .....	73
Figure IV- 9 Température de l'air ambiant moyenne mensuelle reçue .....	74
Figure IV- 10 Schéma du système hybride simulé (Source : HOMER Pro).....	75
Figure IV- 11 Spécifications des modules solaires photovoltaïques.....	75
Figure IV- 12 Spécifications HOMER Pro pour le convertisseur.....	76
Figure IV- 13 Spécifications HOMER Pro pour éolienne .....	77
Figure IV- 14 Courbe de puissance d'éolienne.....	77
Figure IV- 15 Spécifications HOMER Pro pour le système de stockage (batterie).....	79
Figure IV- 16 La charge primaire AC (bleu), la charge primaire AC desservie (marron) et la charge électrique non satisfaite (rouge) .....	79
Figure IV- 17 Puissance globale de rayonnement solaire .....	80
Figure IV- 18 Puissance de sortie photovoltaïque .....	80
Figure IV- 19 Puissance de sortie de l'éolienne .....	81
Figure IV- 20 État de charge du stockage de la batterie pendant un an.....	81
Figure IV- 21 Indicateurs de performance simulés pour le banc de batteries.....	82
Figure IV- 22 Résultat final du processus de simulation et d'optimisation.....	82
Figure IV- 23 Production et demande d'électricité pour le système photovoltaïque-éolien ....	83
Figure IV- 24 Contribution des unités de puissance pour une utilisation à 100 % des énergies renouvelables.....	83
Figure IV- 25 Projection des flux de trésorerie nominaux par composantes .....	84

## Liste des tableaux

Tableau IV- 1 : Les coordonnées géographiques du site .....	69
Tableau IV- 2: Rayonnement solaire et vitesse du vent incluant la température moyenne .....	74
Tableau IV- 3 : Paramètres de conception des modules solaires photovoltaïques.....	76
Tableau IV- 4 : Paramètres de conception de l'éolienne .....	78
Tableau IV- 5: Paramètres de conception des batteries .....	78

## **Introduction Générale**

L'énergie électrique devient nécessaire à l'être humain. La production d'énergie électrique dépend principalement des combustibles fossiles, ils sont limités dans la nature et également responsables de la pollution de l'environnement. Les ressources énergétiques renouvelables offrent une meilleure alternative pour l'avenir, par rapport aux ressources énergétiques conventionnelles, l'aspect économique est un problème majeur des sources d'énergie renouvelables avec la faisabilité et l'efficacité. Ces limitations sont tentées de surmonter par le déploiement de ressources d'énergie renouvelable hybrides. Il existe certains critères pour analyser et mettre en œuvre le système dimensionné, optimisé et rentable [1].

Une nouvelle approche pour des combinaisons optimales de systèmes d'énergie renouvelable hybrides (HRES) est proposée, pour les communautés isolé (éloignées) sans diesel et les problèmes de prise de décision connexes. L'objectif de la conception est de satisfaire la charge avec une minimisation du coût total en tenant compte des contraintes associées, où toutes les équations analytiques sont données [2].

L'énergie éolienne et solaire est omniprésente, disponible gratuitement et respectueuse de l'environnement. Les systèmes d'énergie éolienne peuvent ne pas être techniquement fiables sur tous les sites en raison de la faible vitesse du vent et d'être plus imprévisibles que l'énergie solaire. L'utilisation combinée de ces sources d'énergie renouvelables devient donc de plus en plus attractive et est largement utilisée comme alternative à l'énergie pétrolière. Les aspects économiques de ces technologies d'énergie renouvelable sont suffisamment prometteurs pour les inclure dans l'augmentation de la capacité de production d'électricité dans les pays en développement. Un système d'énergie hybride renouvelable se compose d'au moins deux sources d'énergie, d'un équipement de conditionnement d'énergie, d'un contrôleur et d'un système de stockage d'énergie en option [3].

Ces systèmes d'énergie hybrides sont de plus en plus populaires dans les applications de production d'électricité dans les régions éloignées en raison des progrès des technologies d'énergie renouvelable et de l'augmentation substantielle des prix des produits pétroliers. Les efforts de recherche et de développement dans les technologies solaires, éoliennes et autres énergies renouvelables sont nécessaires pour améliorer leurs performances, établir des techniques permettant de prédire avec précision leur production et de les intégrer de manière fiable avec d'autres sources de production conventionnelles. Le but de cette étude est de

passer en revue l'état actuel de la conception, de l'exploitation et des exigences de contrôle des systèmes d'énergie hybride PV solaire-éolienne autonomes avec une source de stockage [3].

Ce mémoire sera organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique. Tout d'abord, nous présentons le contexte de l'énergie électrique mondiale. Ensuite, un état de l'art sur les énergies renouvelables et systèmes d'alimentation électriques, ainsi que les différents types d'énergie renouvelables, notamment l'éolienne et le solaire photovoltaïque. Nous allons également sites quelque avantages et inconvénients des énergies renouvelables. Pour le reste de ce chapitre nous allons spécifier les caractéristiques ainsi que les différents composants des deux énergies photovoltaïques et éolien. Nous finirons ce chapitre par une conclusion.

Le deuxième chapitre a pour objet d'exposer et identifier le hybride, il portera également sur les différentes combinaisons hybrides. Dans un premier temps nous s'intéressons à la description du système hybride choisie qui est la combinaison photovoltaïque-éolienne, au mode de fonctionnement, ses principaux composants, Les architectures et les critères énergétiques du système hybride seront également présentés dans ce chapitre. Deuxièmement à la description du principe d'un système de stockage et les différents technologies de stockages d'énergies. Nous parlerons ainsi de l'hybridation des unités de stockage en site isolé ainsi que des petites astuces pour choisir le meilleure type de batteries. Enfin, nous finirons par une conclusion.

Concernant le troisième chapitre, nous aborderons la modélisation des principaux éléments du système hybride photovoltaïque-éolienne avec système de stockage (Batteries), les études de modélisation vont traiter chaque éléments séparément ( le générateur éolien, le générateur photovoltaïque, le convertisseur et les batteries). Enfin, nous finirons par une conclusion.

Le quatrième chapitre porte sur la simulation et l'optimisation du système étudié photovoltaïque-éolienne-Batterie nous avons pris les coordonnées géographiques et météorologiques du site de Zenata, Tlemcen dans cette études. En utilisant le logiciel spécial au installations hybrides **HOMER PRO**, Les systèmes hors réseau et connectés au réseau peuvent être conçus et simulés dans ce logiciel. Cette optimisation de l'énergie permettra de trouver et d'étudier le meilleur compromis entre l'énergie totale produite et le coût de production. Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale qui résume les travaux.

## Références bibliographiques

- [1] F. A. Khan, N. Pal, and S. H. Saeed, “Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis methodologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92. Elsevier Ltd, pp. 937–947, Sep. 01, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.107.
- [2] A. Ahadi, S. K. Kang, and J. H. Lee, “A novel approach for optimal combinations of wind, PV, and energy storage system in diesel-free isolated communities,” *Appl. Energy*, vol. 170, pp. 101–115, May 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.02.110.
- [3] P. Nema, R. K. Nema, and S. Rangnekar, “A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 8. Pergamon, pp. 2096–2103, Oct. 01, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.10.006.

# Chapitre I

Etat de l'art sur les énergies renouvelables et  
systèmes d'alimentation électriques

### Introduction

Depuis le début du siècle, la consommation mondiale d'énergie a très fortement augmenté dans toutes les régions du monde. Quel que soit le scénario envisagé, il semble que sous l'influence de la croissance économique d'une part, d'autre part, la consommation d'énergie semble continuer à augmenter à mesure que la consommation d'électricité par habitant augmente. Pour cette raison, les énergies renouvelables sont une solution appropriée aujourd'hui et à long terme, elles peuvent répondre à cette demande énergétique en réduisant les principaux inconvénients des émissions d'énergie fossile et fissile (gaz à effet de serre). En raison de leur flexibilité, de leur facilité d'utilisation et des multiples domaines d'activités nécessaires à leur fonctionnement, ils sont devenus des formes d'énergie incontournables. Au cours des prochaines décennies, ces méthodes de production et les méthodes de distribution associées subiront de profonds changements. La quantité d'énergie renouvelable disponible est supérieure aux besoins actuels en énergie humaine et permet également à plus de 2 milliards de personnes vivant dans des zones reculées d'accéder à l'électricité. La combinaison de ces atouts avec l'efficacité toujours croissante du secteur a favorisé le développement des énergies renouvelables. [1].

## I. Généralités sur les énergies renouvelables

### I.1 Les énergies renouvelables

L'énergie renouvelable est une sorte d'énergie qui peut se renouveler si rapidement qu'elle est considérée comme inépuisable à l'échelle humaine. L'énergie renouvelable provient de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les étoiles, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique). La renouvelabilité de l'énergie ne dépend pas seulement de son rythme. La source se régénère, mais consomme également du débit. Par exemple, tant qu'il y a moins d'arbres abattus que d'arbres qui poussent, le bois est une source d'énergie renouvelable. Par conséquent, considérez le comportement des consommateurs d'énergie. Le concept d'énergie renouvelable est souvent confondu avec le concept d'énergie propre. Cependant, même si l'énergie peut être à la fois une énergie renouvelable et une énergie propre, toute énergie renouvelable n'est pas forcément une énergie propre: par exemple, certains réfrigérants utilisés dans les circuits de pompe à chaleur géothermique sont des gaz, et une fois qu'une fuite se produit, elle provoquera l'effet de serre, et peut également détruire la couche



d'ozone. À l'exception de la nature infinie, ces sources d'énergie n'ont presque pas de pollution [2].

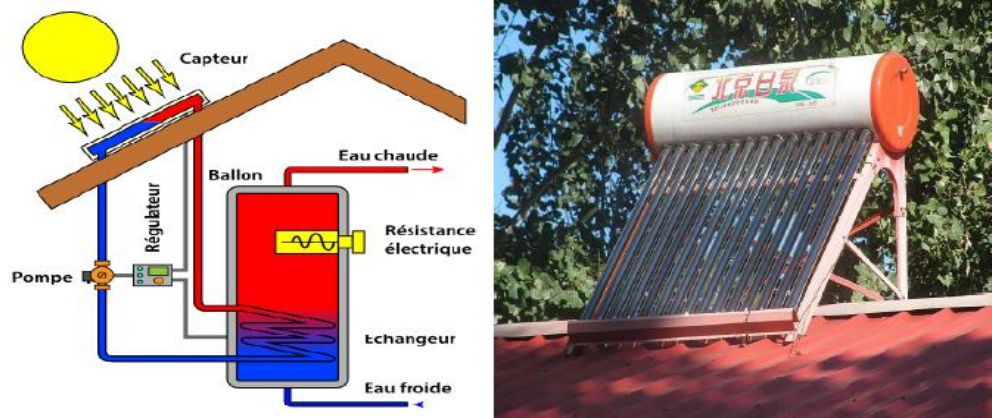
## **I.2 Les différents types des énergies renouvelables**

### **I.2.1 Énergie solaire**

#### **I.2.1.1 Energie solaire thermique**

L'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement :

- Chauffage direct des locaux ou eau sanitaire (bâtiments bioclimatiques, chauffe-eau solaires) ou alimentaire (fours solaires).



**Figure I- 1 Energie solaire thermique [3]**

Génère indirectement de la vapeur à partir du fluide caloporteur pour entraîner la turbine afin d'obtenir de l'énergie électrique (énergie solaire thermodynamique ). La concentration du rayonnement solaire à la surface du capteur permet d'obtenir des températures très élevées, généralement comprises entre 400 ° C et 1000 ° C. La chaleur solaire produit de la vapeur, qui alimente la turbine, qui elle-même alimente le générateur qui génère de l'électricité, c'est l'hélio-thermodynamie. Trois technologies différentes sont utilisées dans la concentration des centrales solaires (concentrateur parabolique, concentrateur à tour, concentrateur cylindro-parabolique)[4].

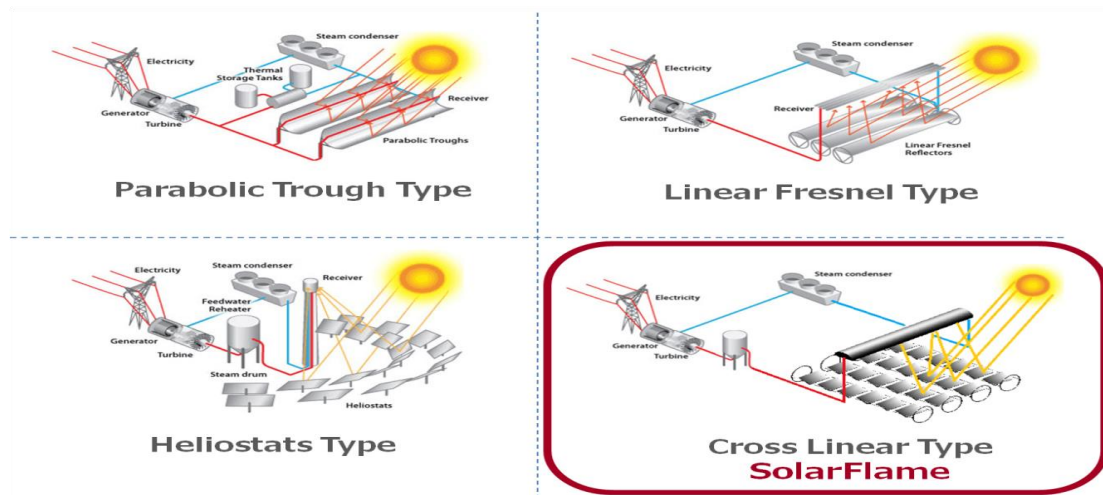


Figure I- 2 Energie solaire à concentration [5]

### I.2.1.2 Énergie solaire photovoltaïque

L'élément de base de l'énergie solaire photovoltaïque est la cellule photovoltaïque : exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux d'une partie d'entre eux. Ceux-ci mettent en mouvement des électrons qui sont attrapés par un champ électrique interne. Les électrons collectés à la surface de la cellule génèrent un courant électrique continu [6].

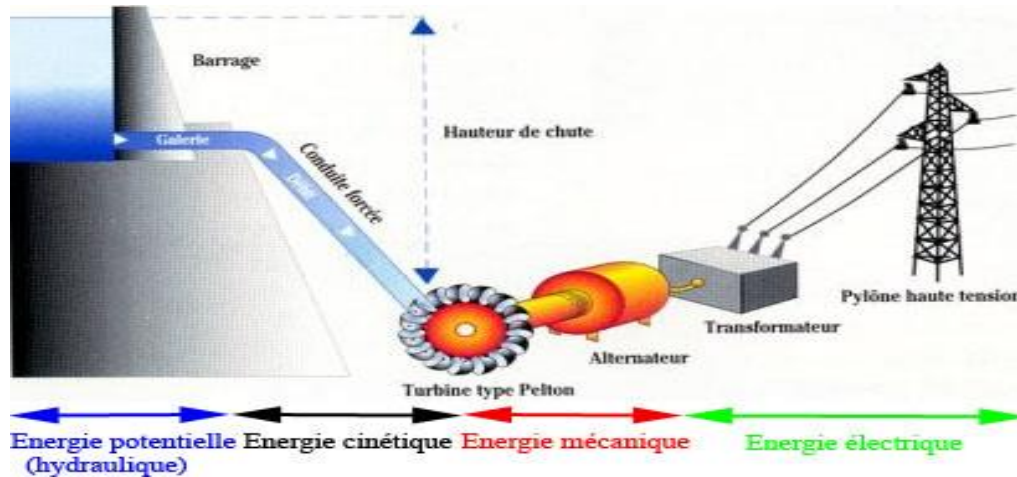
### I.2.2 La géothermie

Le mot «géothermie» recouvre les méthodes de captage de la chaleur intérieure terrestre et l'utiliser comme source de chaleur ou la convertir en énergie électrique grâce à des turbines et des générateurs électriques. Afin de capter cette énergie, des fluides circulent dans les profondeurs terrestres. Ces fluides peuvent être des fluides injectés dans des roches imperméables chaudes ou des couches d'eau captives naturelles dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide (eau) se réchauffe et monte à mesure que la température augmente [7].

### I.2.3 Énergie hydraulique

L'hydroélectricité est produite en convertissant l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique via le rotor de l'alternateur, qui est connecté à des composants mécaniques situés autour des roues motrices. L'énergie extraite de l'eau laissée derrière le barrage dépend de la quantité d'eau et de la hauteur de la goutte. Cette source a l'avantage de ne pas être contaminée. Grâce aux différents filtres du barrage, nous pouvons contrôler le stockage

d'énergie de manière très simple pour éliminer les déchets dans la voie navigable et maîtriser la technologie nécessaire à son utilisation. Le bruit, l'impact sur les organismes aquatiques, l'installation compliquée et les lieux de fonctionnement limités sont ses principaux inconvénients[7].



**Figure I- 3 L'énergie hydraulique [9]**

#### **I.2.4 Les énergies marines ( houlomotrice )**

L'énergie marine ou océanique est extraite du milieu marin. Ceux-ci comprennent l'énergie marémotrice (le mouvement de l'eau produite par les marées), l'énergie des vagues (utilisant la puissance du mouvement des vagues) l'énergie thermique des océans (générée en utilisant la différence de température entre l'eau de surface et l'eau de mer profonde) et l'énergie éolienne offshore. Turbines et énergie osmotique (la diffusion d'ions provoquée par l'eau douce atteignant l'eau salée dans l'eau de mer). Comme les autres ressources renouvelables, il est également sans pollution dans le processus de production. Il convient également de noter que l'énergie potentielle disponible est énorme et qu'elle est une technologie future glorieuse [4].

#### **I.2.5 La biomasse**

Représentant toute la matière organique, qu'elle soit d'origine végétale ou animale. Il peut provenir des forêts, des milieux marins et aquatiques, des parcs et jardins, des industries qui produisent des sous-produits, des déchets organiques ou des eaux usées du bétail. C'est la principale source d'énergie pour la cuisine et le chauffage, y compris tous les produits

obtenus à partir de végétaux ou de résidus végétaux, séchés ou déshydratés, tels que le bois, la paille de riz, le grignon d'olive, peut être utilisée par combustion ou métabolisme. Cependant, pour devenir une véritable source d'énergie renouvelable, la quantité brûlée ne doit pas dépasser la quantité produite. Selon les besoins, il peut générer de la chaleur ou de l'électricité. En conséquence, par rapport aux autres sources d'énergie, sa participation à la production mondiale d'énergie est énorme [4].

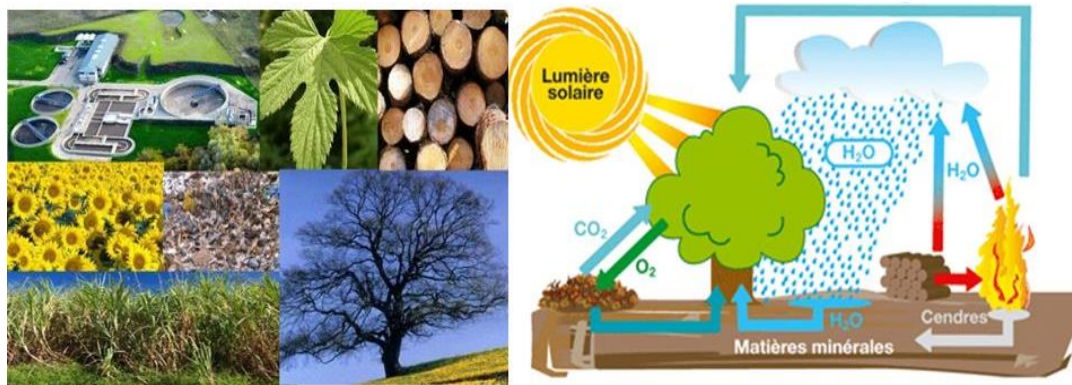


Figure I- 4 Energie biomasse [11]

### I.3 Les avantages et inconvénients des énergies renouvelables

- Energie propre : n'émettent presque pas ou pas de gaz à effet de serre. Ils ne transportent pas non plus de grandes quantités de déchets et n'utilisent pas de carburant pour fonctionner, C'est une énergie à faible pollution.
- Énergie gratuite: les énergies renouvelables font partie de la nature. Afin de la convertir en énergie utilisable il est absolument nécessaire de construire un système approprié Et profiter du don de la nature.
- Énergie infinie: À échelle humaine, le rayonnement solaire, le vent et l'énergie hydraulique sont des ressources inépuisables. Bien que la quantité fournie puisse varier.
- Énergie sûre: les appareils liés aux énergies renouvelables provoquent rarement des accidents[12].

#### De manière inattendue, il y a des inconvénients des énergies renouvelables

- L'impact de la vision et du son sur la vie des résidents. C'est le cas des panneaux solaires sur les maisons, les parcs éoliens offshore ou sur les toits à proximité des maisons.

- Dépendance des conditions météorologique comme pour le solaire et l'éolienne , la production d'électricité diminue par temps nuageux et en absence de vent.
- Impact sur l'écosystème. Par exemple une installation barrages hydroélectriques résulte des vallées inondées et détruit la faune et la flore locales (immigration des espèces poissons comme le saumon)[12].

### I.4 Energie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque repose sur l'effet photoélectrique pour générer du courant continu. La source lumineuse naturelle (soleil). Les équipements photovoltaïques connectés au réseau se composent généralement de plusieurs **panneaux photovoltaïques** dont le nombre varie de dix à plusieurs milliers [13]. Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque réside dans la superposition de deux fines couches de silicium, lorsque la couche supérieure reçoit les photons de la lumière, il se crée une différence de tension entre les deux couches, générant alors un courant continu. Un module (panneau, capteur) photovoltaïque résulte de l'assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques [14].

#### I.4.1 Description générale des modules photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques ou les photopiles convertissent directement l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Sous l'action du rayonnement lumineux incident, les électrons de la bande de valence du semi-conducteur pourront entrer dans la bande de conduction et devenir libres. Ce phénomène générera des paires électron-trou dans la structure semi-conductrice. Celles-ci vont s'accumuler sur chaque surface extérieure des régions P et N sous l'action de la barrière de potentiel, de sorte qu'une ddp (différence de potentiel) sera généré entre les surfaces extérieures de la jonction[15].

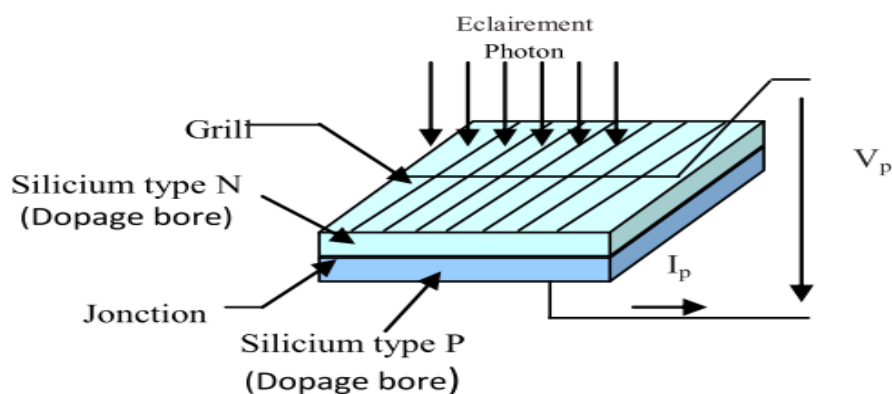


Figure I- 5 Composition d'une cellule PV [16]

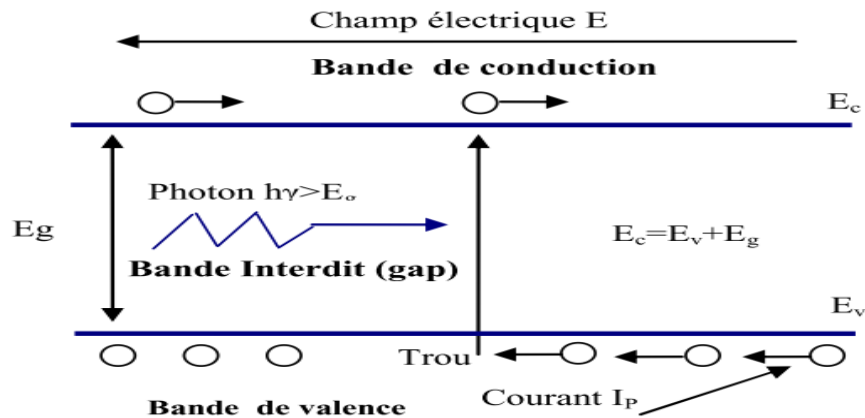


Figure I- 6 Principe de la conversion photon-électron [17]

## I.4.2 Technologie photovoltaïque

### I.4.2.1 Les modules solaires monocristallins

Possèdent le rendement le plus élevé par mètre carré et sont principalement utilisés dans un espace limité pour optimiser la production de centrales photovoltaïques[13]. Le capteur photovoltaïque monocristallin est constitué d'un morceau de silicium pur, qui est formé d'un monocristal. Ce procédé (35% du marché) est coûteux, mais Permet d'accéder au meilleur rendement , d'un point de vue esthétique, les cellules qui composent le panneau ont une couleur uniforme et ont la forme d'un petit carré avec un angle de coupe [18].

### I.4.2.2 Les modules solaires poly-cristallins

Représentent une technologie avec un rendement inférieur par rapport à la technologie monocristalline, la fabrication d'un capteur poly-cristallin se fait à partir de déchets de silicium monocristallin et représente le panneau le moins chers du marché (56% des panneaux) [18].

### I.4.2.3 Les modules de cellules solaires amorphes

Sont des panneaux solaires que leur rendement est bien inférieur à celui des modules de cellules solaires cristallines. Par conséquent, pour une même puissance d'installation, cette solution nécessite une plus grande surface [13]. le silicium amorphe est composé d'une succession de couches de silicium dopées et non dopées. En utilisant cette technique, le rendement est encore très faible (environ 7 à 8%). La baisse du coût de fabrication des cellules en silicium cristallin a poussé ce type de capteur hors du marché et se limite aux calculatrices et autres zones de production [18].

#### I.4.2.4 Les couches minces

Ces modules (Thin film) font actuellement l'objet de nombreuses études. On estime que dans les prochaines années, le rendement actuel est d'environ 6 à 8% [19]. Ils sont adaptés à une utilisation dans des situations où l'espace d'installation est grand, ainsi ils représentent de nombreuses technologies, dont trois sont : a-Si le silicium en couche mince ou silicium amorphe, CdTe (Tellure de Cadmium), CIS (Sélénure de Cuivre Indium) Ainsi que le CIGS[19].

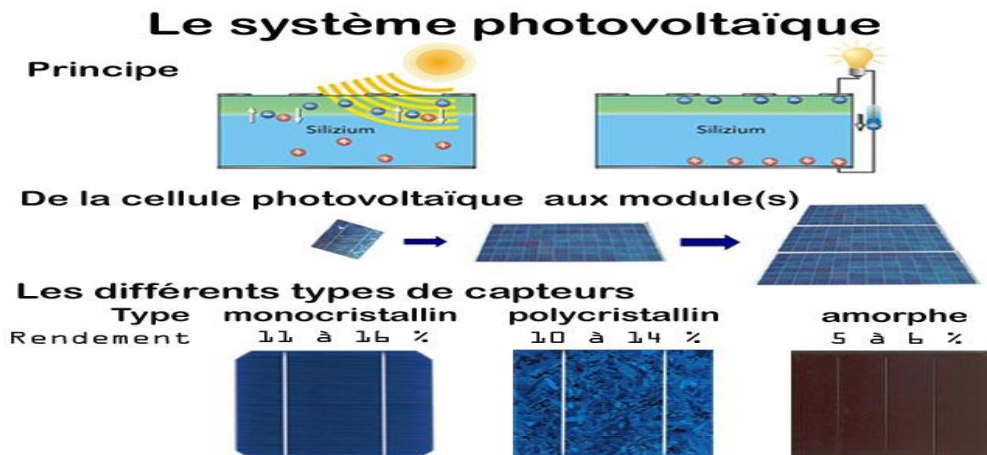


Figure I- 7 Système Photovoltaïque [14]

### I.4.3 Les différents systèmes photovoltaïques

#### I.4.3.1 Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau

##### I.4.3.1.1 Systèmes PV raccordés au réseau avec injection totale

###### a) Injection totale sans stockage

Les générateurs photovoltaïques convertissent directement le rayonnement solaire en énergie électrique. Le courant continu généré par le module photovoltaïque est converti en courant alternatif compatible avec les caractéristiques électriques du réseau public de distribution grâce à un onduleur photovoltaïque. L'énergie produite est entièrement injectée dans le réseau public de distribution pour pouvoir être valorisée dans les meilleures conditions économiques du producteur. En cas de panne du réseau (perte de tension ou tension et fréquence hors tolérance), L'onduleur photovoltaïque cesse de fonctionner [20].

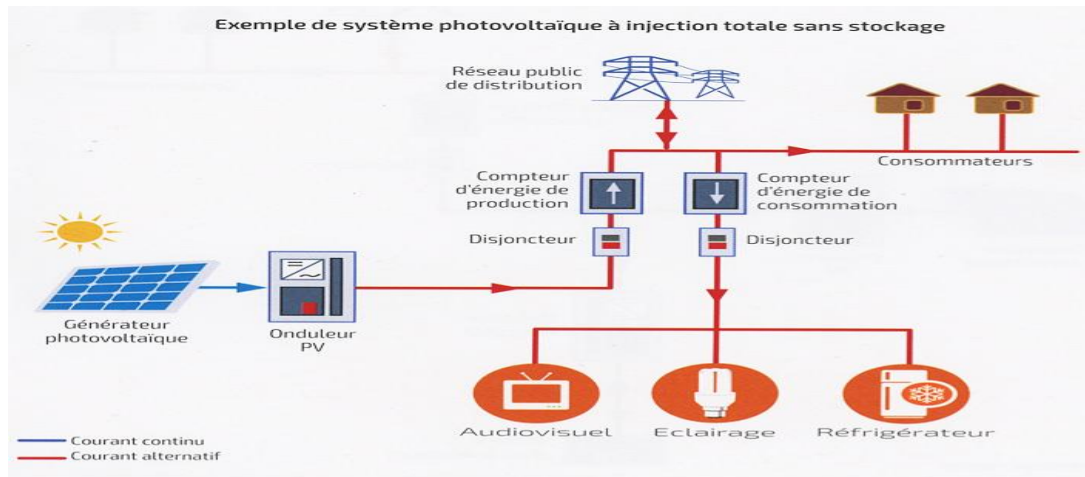


Figure I- 8 Système injection totale sans stockage [21]

b) Injection totale avec stockage

Son principe est le même que ci-dessus, mais le stockage d'énergie de l'accumulateur est intégré dans l'usine de production. Cependant, pour des raisons économiques, ce stockage est très limité afin de stabiliser la production ou bien de restituer l'énergie [20].

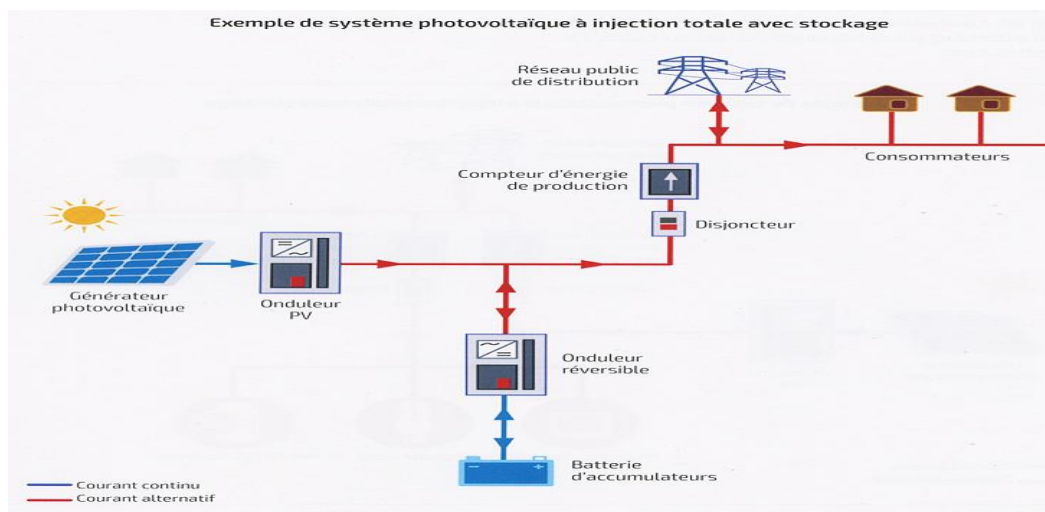


Figure I- 9 Système injection totale avec stockage [21]

I.4.3.1.2 Systèmes PV raccordés au réseau avec autoconsommation

a) Autoconsommation sans stockage

Le système est directement connecté à l'installation électrique intérieure sur site. L'énergie solaire est consommée par le récepteur utilisé. Tout excès d'énergie solaire généré sera injecté



dans le réseau de distribution public. Si le réseau tombe en panne (la tension ou la perte de tension et de fréquence dépasse la tolérance), l'onduleur photovoltaïque s'arrêtera de fonctionner et ne fournira plus d'alimentation au récepteur [20].

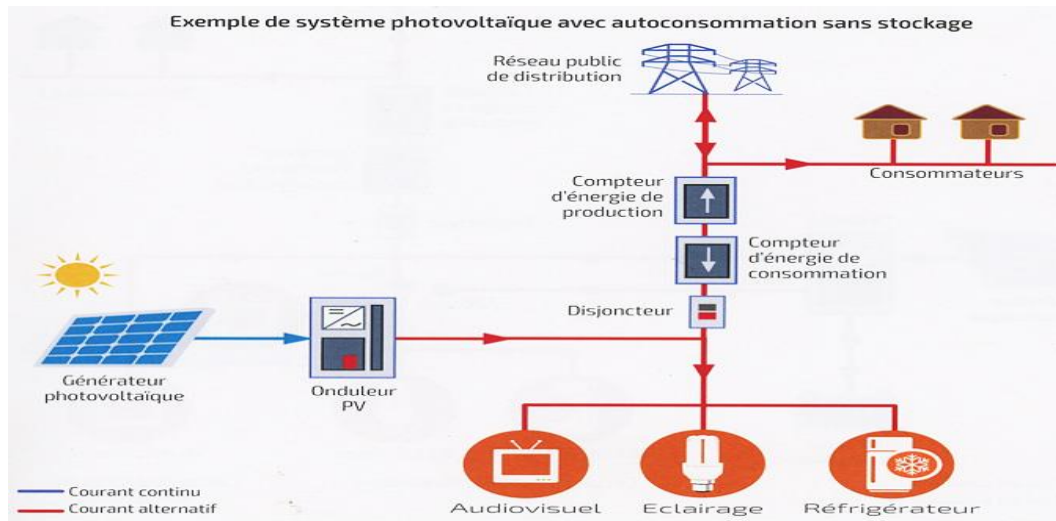


Figure I- 10 Système autoconsommation sans stockage [21]

### b) Autoconsommation avec stockage

Le stockage d'énergie est intégré au système via l'accumulateur, ce qui permet de stocker l'énergie produite par le générateur photovoltaïque pendant la journée et de la restituer pour une consommation locale la nuit. Cependant, pour des raisons économiques, le dispositif de stockage ne peut fonctionner que quelques heures et ne peut pas se débarrasser complètement des ennuis du réseau [20].

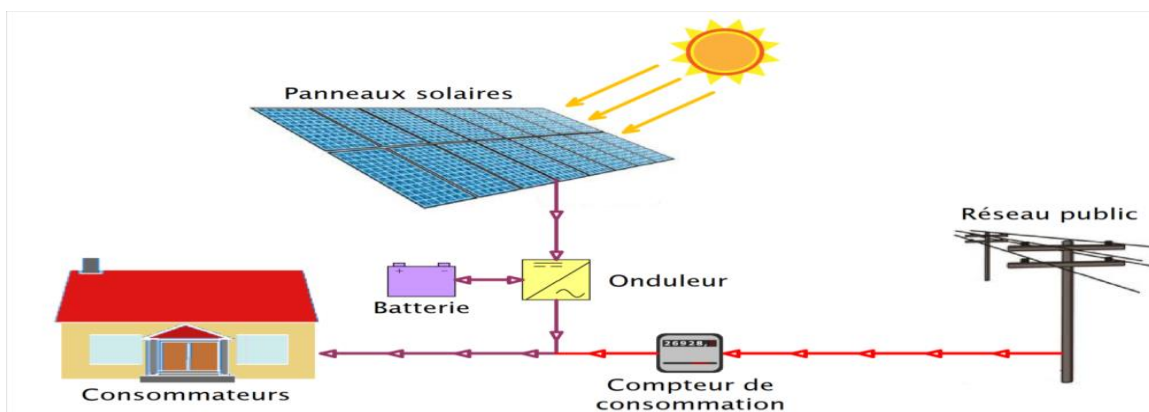


Figure I- 11 Système autoconsommation avec stockage [22]

### I.4.3.2 Systèmes photovoltaïques autonomes

#### a) Systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage

Ils fonctionnent de la manière suivante. Pendant la journée, les générateurs photovoltaïques alimentent les utilisateurs directement ou via des convertisseurs CC / CC ou CC / AC . La puissance fournie dépend de la quantité de lumière solaire. Pendant la nuit, l'appareil n'est plus alimenté, Les principales applications photovoltaïques fonctionnant sous le soleil (pompage, ventilation, réfrigération, dessalement..) [20].

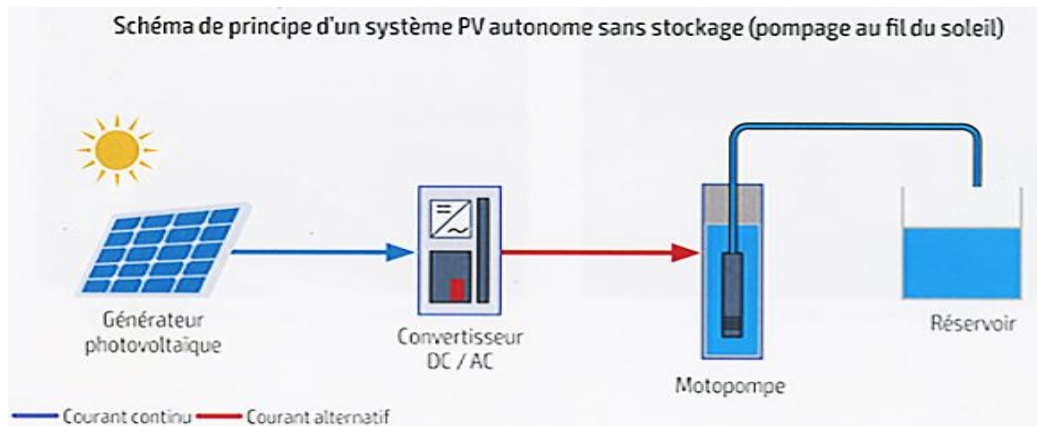


Figure I- 12 Systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage [21]

### b) Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage

Pendant la journée, le générateur photovoltaïque alimente le récepteur CC et charge la batterie de stockage . Le contrôleur de charge empêche la surcharge de la batterie en cas de surproduction d'énergie solaire. La nuit et par mauvais temps, lorsque le récepteur est alimenté par la batterie et profondément déchargé, le limiteur peut protéger la batterie. Dans le cas du récepteur fonctionnant sur courant alternatif AC, ainsi l'onduleur autonome convertit la tension continue en tension alternative [20].

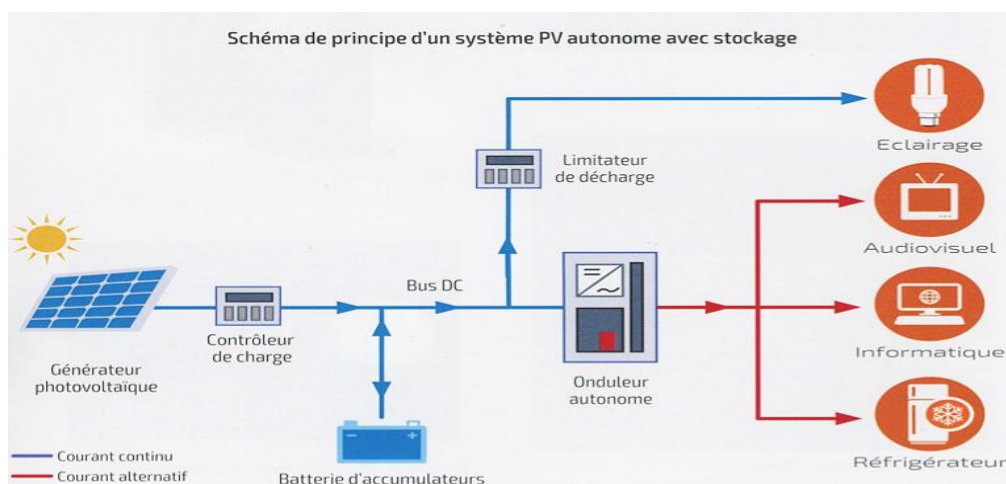


Figure I- 13 Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage [21]

### I.4.3.3 Systèmes photovoltaïques hybrides

#### a) Systèmes photovoltaïques hybrides avec stockage

Pendant la journée, le générateur photovoltaïque charge la batterie tout en alimentant l'onduleur, ce dernier convertit la tension continue en tension alternative et alimente le récepteur qui fonctionne en alternance. Le contrôleur de charge empêche la batterie de se surcharger lorsque l'énergie solaire est surproduite. La nuit, l'onduleur est alimenté par des batteries. En cas d'ensoleillement insuffisant ou de consommation plus élevée du récepteur, un générateur de secours ou de secours peut fournir une alimentation directe au récepteur et charger la batterie pour assurer la continuité du service [20].

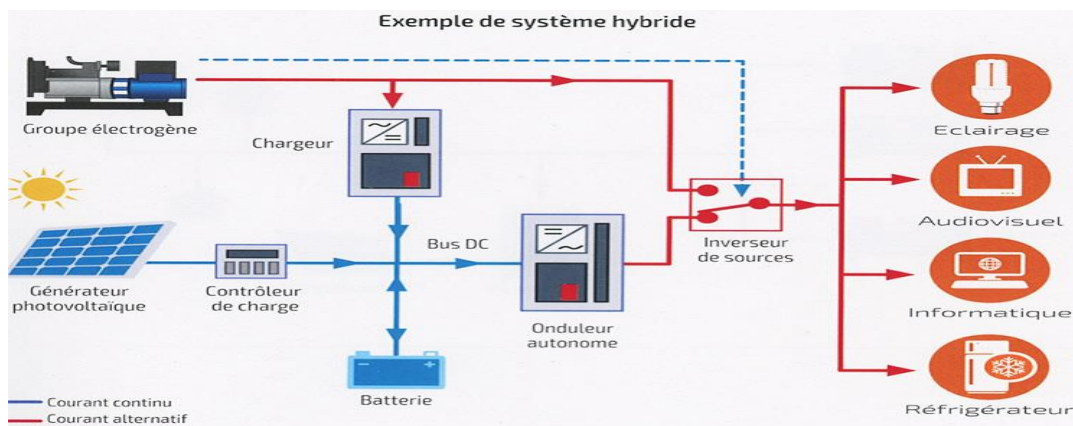


Figure I- 14 Systèmes photovoltaïques hybride avec stockage [21]

#### b) Systèmes photovoltaïques hybrides sans stockage

Le générateur photovoltaïque injecte une puissance variable dans le réseau en fonction de la quantité d'ensoleillement. Toute l'énergie fournie par le générateur PV ne sera pas fournie par le groupes électrogène, de sorte que la consommation de carburant et les coûts d'exploitation peuvent être réduits. Les systèmes hybrides avec une capacité de stockage (de quelques kilowatts à des centaines de kilowatts) sont largement utilisés, notamment pour fournir des maisons individuelles, des refuges de montagne et des répéteurs de télécommunications haute puissance et pour l'électrification rurale. Les systèmes hybrides sans stockage (de plusieurs dizaines de kilowatts à plusieurs mégawatts) sont principalement utilisés pour l'électrification des grands villages et les alimentations électriques pour les mines d'extraction [20].

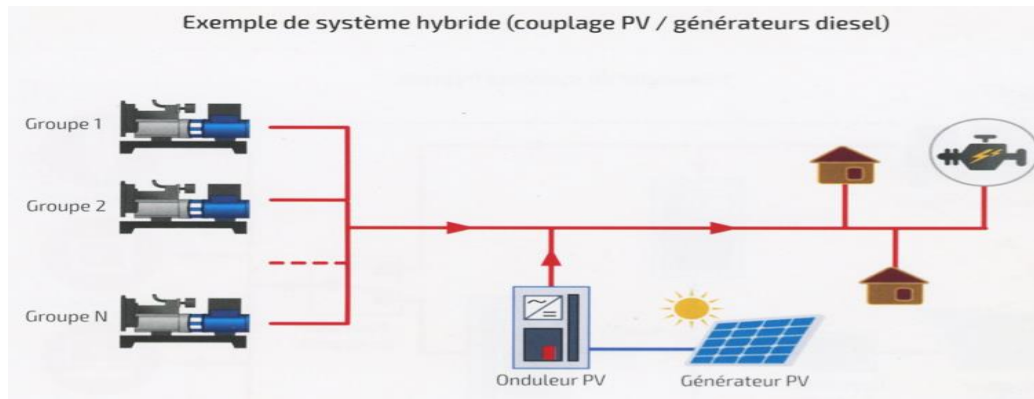


Figure I- 15 Systèmes photovoltaïques hybride sans stockage [21]

### I.4.4 Performances & caractéristiques électriques courant-tension d'un module photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques appelés modules sont constitués de cellules photovoltaïques connectées en série et en parallèle. Il sont défini par la puissance de crête dans les conditions de test standard, la tension et le courant sous la puissance de crête, et la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit. Les conditions de test standard (STC) correspondent à une irradiance de  $1000 \text{ W / m}^2$ , une température de  $25 \text{ }^\circ \text{C}$  et une qualité de l'air optique AM (qualité de l'air) égale à 1,5. Les caractéristiques électriques des modules vendus peuvent être sensiblement différentes à la même puissance, selon que les niveaux de courant ou de tension sont idéaux. Les caractéristiques des modules photovoltaïques dépendent des matériaux utilisés pour fabriquer les modules et des conditions physiques de fonctionnement (emplacement des modules, ensoleillement et température) [15].

**Les performances caractéristique sont définie comme :**

- Le courant de court circuit  $I_{cc}$ .
- La tension de circuit ouvert  $U_{oc}$
- La puissance de crête **MPP** (point de puissance maximale) dans les conditions de test standard est au point de puissance maximale défini par ( $P_{max} = I_{mp} * U_{mp}$ ), ce qui peut maximiser l'utilisation de la puissance de crête installée.

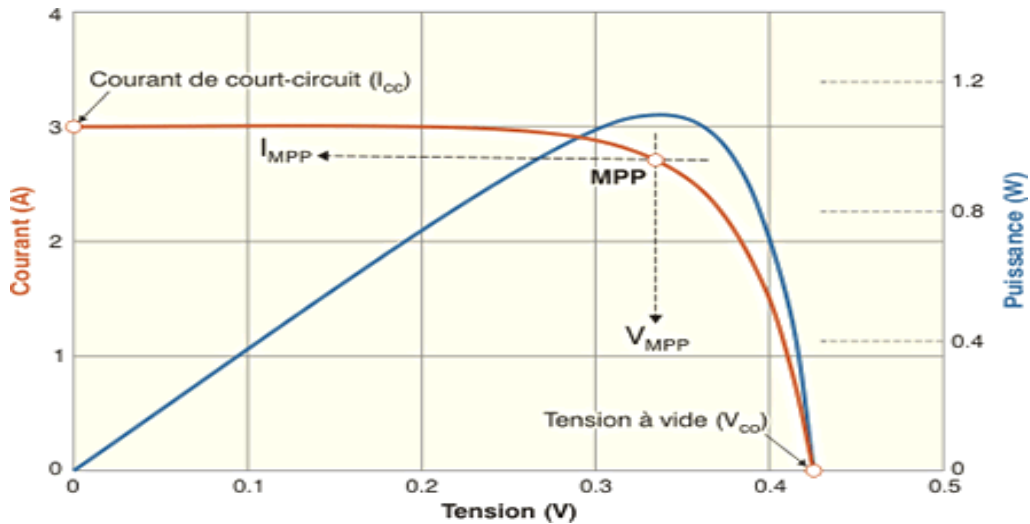
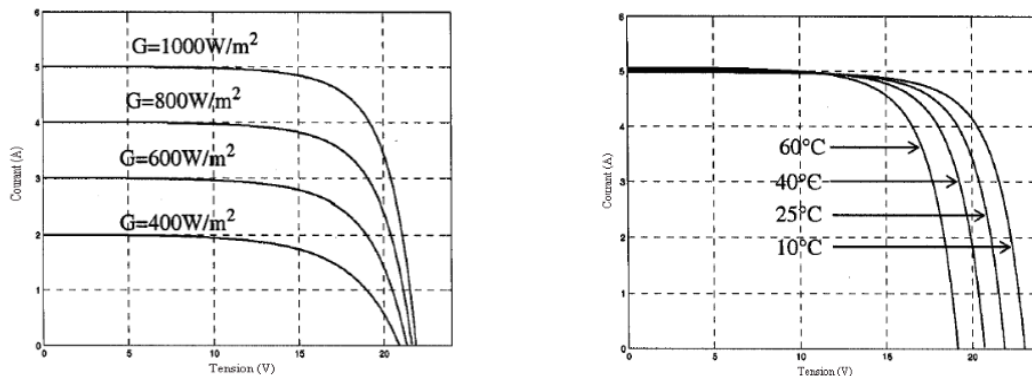


Figure I- 16 Caractéristiques I-V et P-V typique d'un module PV [23]

La figure( I-17) décrit la courbe I-U d'un générateur photovoltaïque de 85 Wc sous différentes conditions de lumière solaire et de température ambiante. À mesure que la température ambiante augmente, la tension diminue. La lumière du soleil a peu d'effet sur cette tension. Lorsque la puissance demandée augmente, le courant de sortie augmente. La tension est réduite au point de fonctionnement correspondant au point de puissance maximale(MPP) [15].



Influence de l'ensoleillement à température constante      Influence de la température à ensoleillement constant

Figure I- 17 Courbe caractéristiques d'un panneau solaire [15]

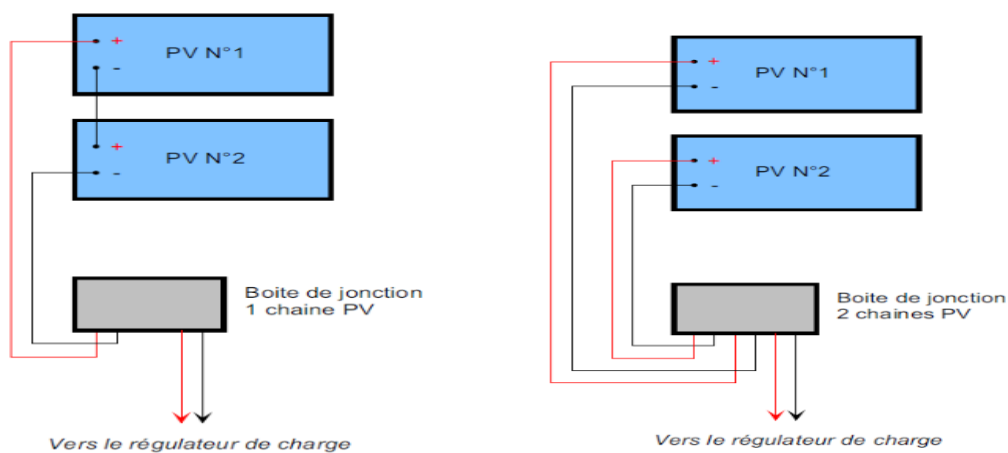
MPP dépend de la température ambiante, en particulier de la lumière du soleil. Le courant de court-circuit changera avec les changements de lumière solaire et de température. La température ambiante a un léger effet sur ce courant. La lumière solaire est un paramètre plus important: le courant délivré par le module est directement proportionnel à l'éclairage

reçu à la surface du panneau. L'efficacité énergétique du module dépend de la nature des matériaux utilisés [15].

## **I.4.5 Câblage des modules solaires**

### **I.4.5.1 Raccordement en série**

Lorsque les panneaux solaires sont connectés en série, tout les panneaux doivent avoir le même courant. Cette connexion autorise l'additionnement des tensions, sans que l'intensité (Ampère) change. Dans cette configuration, la borne (+) du panneau est connectée à la borne (-) du panneau suivant [24].



**Figure I- 18 Raccordement en série(gauche) et en parallèle(droite)[24]**

### **I.4.5.2 Raccordement des modules solaires en parallèle**

Lorsque les panneaux solaires sont connectés en parallèles, tout les panneaux doivent avoir la même tension. Cette connexion autorise l'additionnement des intensités (Ampère), sans que la tension (volt) ne change. Dans cette configuration toutes les bornes (+) de tous les panneaux sont reliées entre elles, ainsi que toutes les bornes(-), la présence d'une boîte de jonction est nécessaire pour l'installation en parallèle[24].

### **I.4.5.3 Raccordement des modules solaires en série/parallèle**

Lorsqu'une certaine quantité de puissance est requise à la tension requise, les règles du montage en série et celles du montage en parallèle s'appliquent dans le cas du montage en série/parallèle [24].

## I.5 Energie éolienne

Représente l'énergie cinétique de masse d'air circulant dans l'atmosphère. Cette dernière est causé par la chaleur radiante solaire. L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie connues. Elle peut être convertie en énergie mécanique pour déplacer des véhicules tels que des voiliers. aussi convertie en puissance pour le pompage, la compression, etc. Plus important encore, la conversion en énergie électrique par un générateur. Dans ce cas, l'éolienne peut être connectée au réseau ou fonctionner automatiquement par couplage avec un système de secours (générateur, système de stockage). Il existe deux types d'éoliennes :les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal [25].

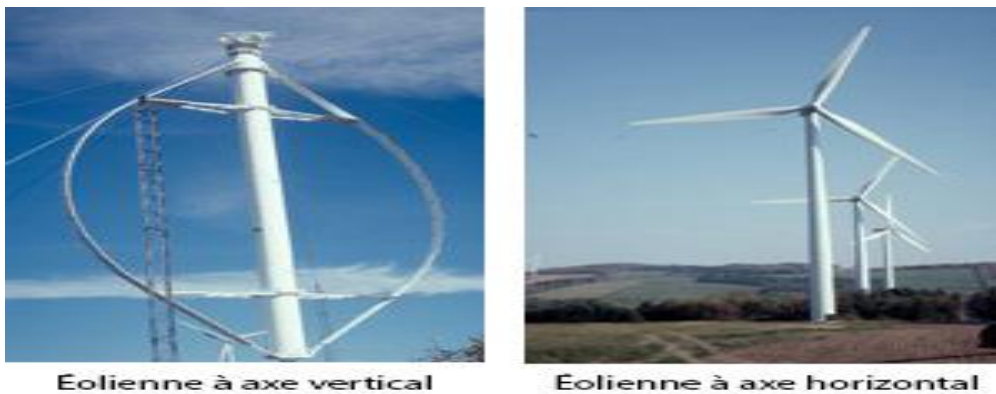


Figure I- 19 Types d'énergie éolienne [26]

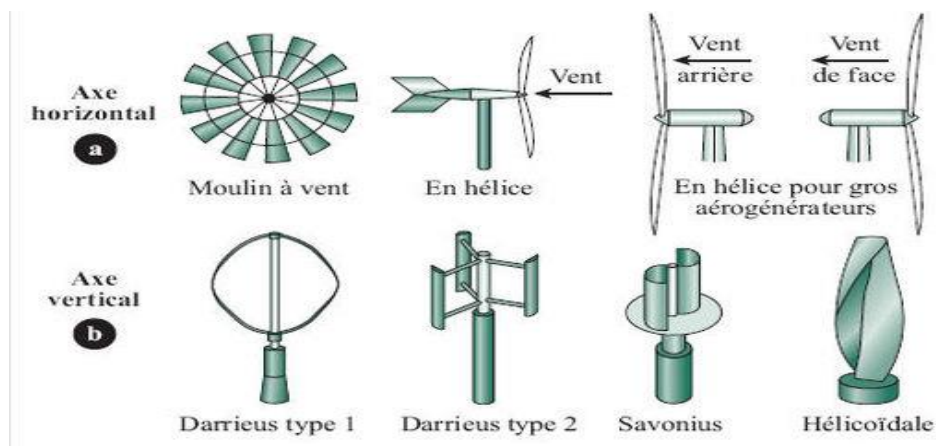


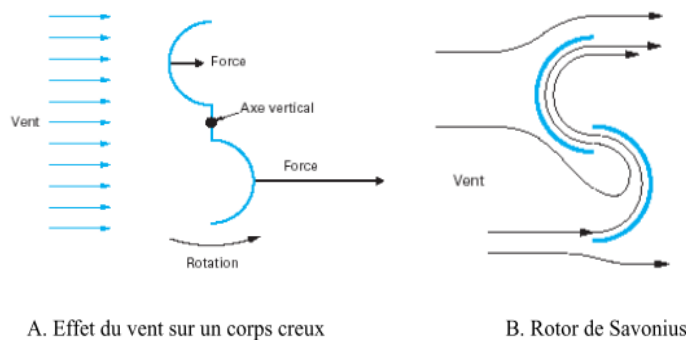
Figure I- 20 Modèles d'éoliennes à axe horizontal et verticale [27]

### I.5.1 Eoliennes à axe vertical

Ce type de machine utilise deux principes différents sont la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.

**I.5.1.1 Traînée différentielle**

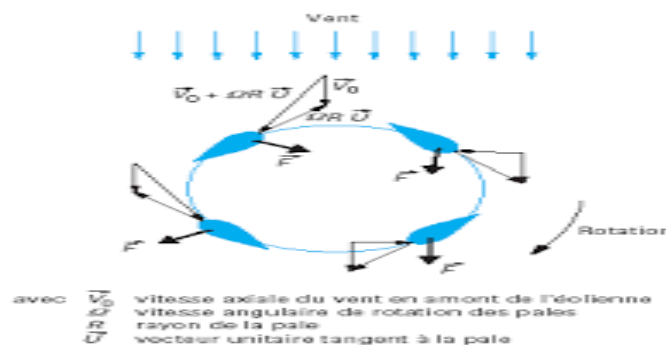
Le principe du déplacement de ce type de machine est que la force exercée par le vent de part et d'autre du corps creux a une force différente. Par conséquent, cela se traduit par un couple moteur, qui peut être utilisé pour entraîner des générateurs ou d'autres équipements mécaniques, tels que des pompes. L'exemple le plus courant de ce type d'éolienne est le rotor Savonius. La circulation d'air entre les deux demi-cylindres peut augmenter le couple moteur [25].



**Figure I- 21 Principe de la traînée différentielle [25]**

**I.5.1.2 Variation cyclique d'incidence**

Basé sur le fait que les contours placés dans le flux d'air à des angles différents sont soumis à des forces qui varient en force et en direction. La combinaison de ces forces produit alors un couple moteur. En fait, les différents angles que supporte le profil proviennent de la combinaison de la vitesse de déplacement du profil (rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent [25].



**Figure I- 22 Principe de la variation cyclique d'incidence [25]**



## I.5.2 Eoliennes à axe horizontal

Sont les descendants directs des moulins à vent, dont les ailes ont été remplacées par des éléments très similaires aux ailes d'avion. La montée de ces ailes produit un couple moteur destiné à entraîner des équipements mécaniques (tels que générateurs, pompes..). Deux types de configurations existent : les éoliennes «amont» avec pales du côté de la tour exposé au vent ainsi que les éoliennes «aval» [25].

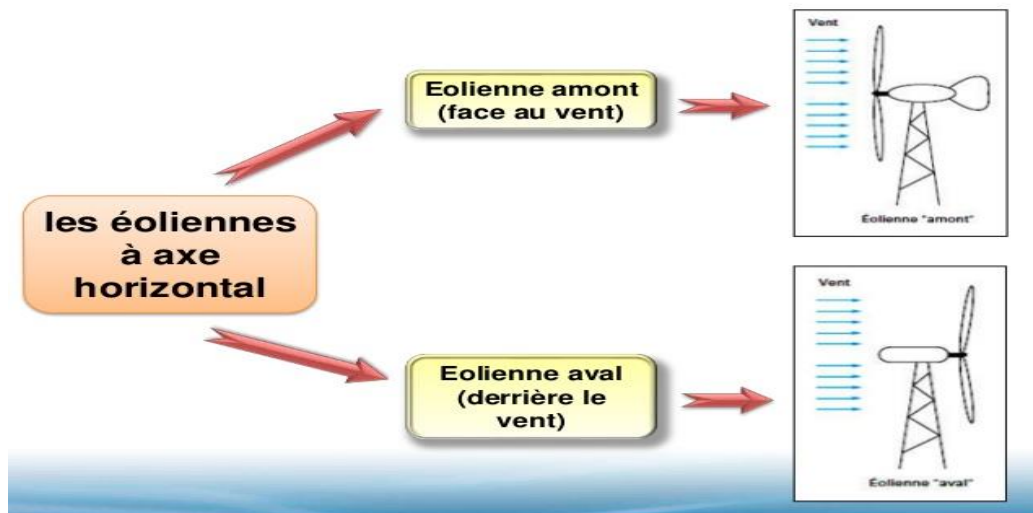


Figure I- 23 Configurations à axe horizontal éolienne face amont et aval [28]

## I.5.3 Principe de fonctionnement

Le modèle d'éolienne est inspiré de la technique du moulin à vent . Le vent fait tourner les pales des éoliennes qui font ainsi tourner leurs arbres. Le rôle d'un arbre est de faire fonctionner une pompe ou un générateur pour assuré de l'électricité. Le nombre de pales d'éoliennes est généralement de 2 à 3 et la longueur de chaque pale est d'environ 10 à 30 m. Les éoliennes modernes peuvent générer de l'électricité propre seules ou en tant que parc éolien [29].

## I.5.4 Architecture d'une éolienne

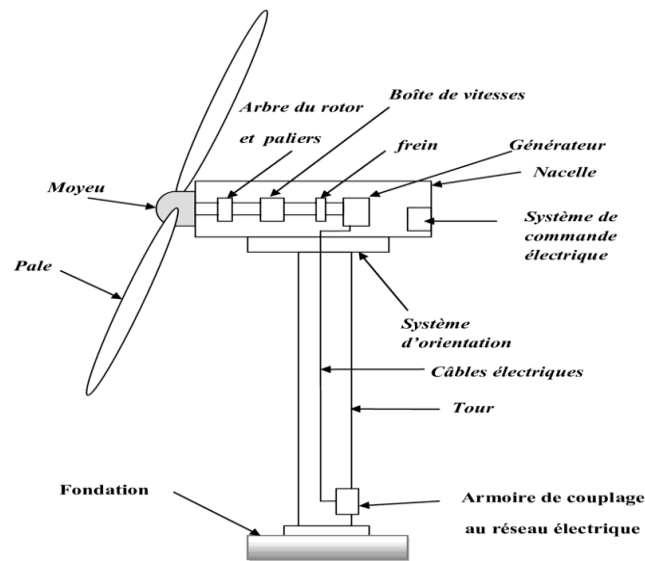


Figure I- 24 Composant d'une éolienne [31]

### I.5.4.1 Rotor

Le rotor est un composant composé de pales et d'un arbre principal, et la liaison entre ces éléments est assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre principal rotatif à basse vitesse comporte un dispositif de passage des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère rotatif). Ce dispositif hydraulique est notamment utilisé pour réguler le fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor) [1].

### I.5.4.2 Nacelle

Sa fonction est d'accueillir les équipements utilisés pour la production d'électricité et ses équipements périphériques. Selon le type de machine, différentes configurations peuvent être rencontrées. Les différents composants sont les suivants:

#### I.5.4.2.1 Multiplicateur de vitesse

Il est utilisé pour augmenter la vitesse de rotation entre l'arbre principal et le contre-arbre qui entraîne le générateur. En effet, la faible vitesse de rotation des éoliennes rendra l'utilisation de générateurs conventionnels impossible pour générer du courant dans de bonnes conditions.

#### I.5.4.2.2 L'arbre secondaire

Comprend généralement un frein mécanique, qui maintient le rotor immobile pendant la maintenance et empêche que la machine soit hors de contrôle[1].

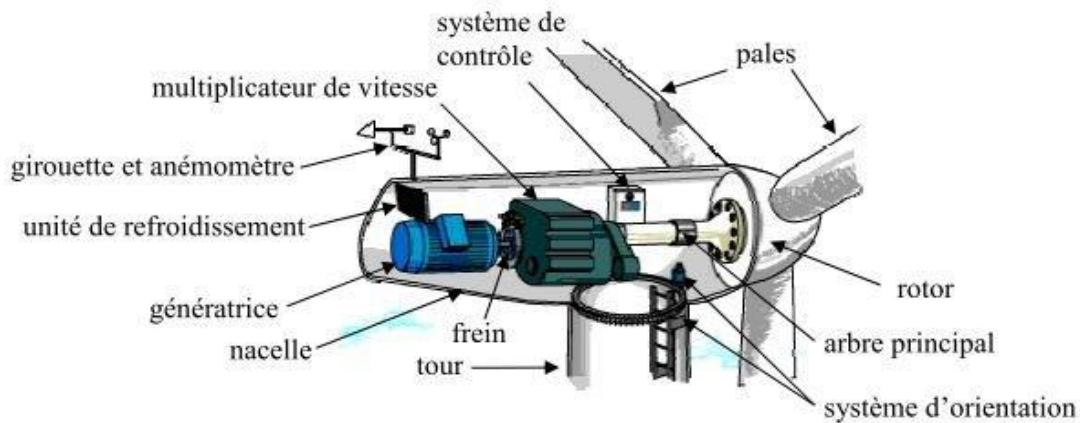


Figure I- 25 Structure d'une nacelle [32]

#### I.5.4.2.3 Génératrice

La génératrice (ou l'alternateur) est généralement asynchrone, et sa puissance électrique peut varier entre 600kW et 2,5MW. Dans certains cas, des générateurs de conception spéciale pouvant fonctionner à la vitesse de l'arbre du rotor sans aucune boîte de vitesses [33]. Donc elle est la partie où l'énergie cinétique (du mouvement) se transforme en énergie électrique. L'arbre lent de l'éolienne lie le moyeu du rotor au multiplicateur.

#### I.5.4.2.4 Contrôleur électronique

Il s'agit en fait d'un ordinateur surveilleur. Lorsque la vitesse du vent est suffisamment grande (environ 5 m / s), il peut gérer le démarrage de la machine, gérer les pales, les freins de la machine, les composants du rotor et de la nacelle face au vent pour maximiser l'efficacité de la récupération d'énergie. Et réduisez le travail instable lors de l'installation. Pour réaliser ces différentes tâches, le contrôleur utilise des données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent) qui sont généralement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur gère également diverses pannes possibles qui peuvent survenir[1].

#### I.5.4.2.5 Divers dispositifs de refroidissement

(Générateur, multiplicateur) par ventilateur, radiateur à eau ou huile.

#### I.5.4.2.6 Dispositif d'orientation de la nacelle

Permet à la nacelle de tourner autour d'un axe vertical à l'extrémité supérieure de la tour. La direction est généralement fournie par le moteur à travers la couronne dentée. De nombreuses éoliennes intègrent des systèmes de verrouillage mécanique pour positionner la

nacelle dans une direction donnée. Cela évite une pression constante sur le moteur électrique et bloque également l'éolienne pendant la maintenance[1].

### **I.5.4.3 Tour**

Sa fonction est de supporter l'ensemble rotor et nacelle d'une part pour éviter que les pales n'entrent en contact avec le sol, et de placer le rotor à une hauteur suffisante pour déplacer le rotor le plus loin possible du gradient de vent existant près du sol, améliorant ainsi la capture d'énergie. Par conséquent, certains fabricants proposent des hauteurs de tour différentes pour le même composant (rotor, nacelle) afin de mieux convenir aux différents emplacements d'installation[1].

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons tenté d'aborder un sujet d'actualité dans se qui concerne l'exploitation des énergies renouvelables vue qu'il sont respectueuses de l'environnement, illimitées et gratuites. Nous avons également donner un aperçu sur les concepts d'énergies renouvelables et identifier leurs types et modes de fonctionnement, ainsi que mentionner leur avantages et inconvénients. Nous avons également étudié en particulier l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne.

Dans le prochain chapitre, nous étudierons les différents systèmes énergétiques hybrides, et nous y porterons une attention particulière au systèmes hybrides photovoltaïque –éolienne.

## Bibliographie

- [1] D. De, G. Mecanique, M. Presente, E. N. Vue De L', O. Du, and D. De, “العلمي البحث و  
INTITULE DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES FILIERE : GENIE وزارة التعليم العالي  
MECANIQUE SPECIALITE : ÉNERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT PRESENTE PAR :  
FERRAH BILLEL DIRECTEUR DU MEMOIRE : PR. H. MZAD DEVANT LE JURY  
.PRESIDENT : “Etude d'un système hybride photovoltaïque-éolien.”, 2015
- [2] “Chapitre I LES SOURCES D'ENERGIES RENOUVELABLES ET NON  
RENOUVELABLES.”,Vol 13,pp. 1-10.
- [3] “Kit solaire thermique. Nos solutions d'énergies propres et renouvelables Eliogen :  
Générateur d'énergies propres.” <http://eliogen.com/solutions.php?pre=12> (accessed  
Apr. 08, 2021).
- [4] B. Manel, A. Belkacem, and B. L. MCB Taloub D MCB, “Département de Génie  
Mécanique ,Option Energétique.”, “Conception d'une centrale photovoltaïque pour  
recharge de voitures”, Juin 2019.
- [5] “株式会社 SolarFlame | Concentrated solar power, Solar thermal, Energy system.”  
<https://www.pinterest.com.au/pin/66498531976649057/> (accessed Apr. 08, 2021).
- [6] “Qu'est-ce que l'énergie solaire photovoltaïque ?” [https://www.futura-  
sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-quest-ce-energie-  
solaire-photovoltaique-14/](https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-quest-ce-energie-solaire-photovoltaique-14/) (accessed Apr. 07, 2021).
- [7] P. D. E. F. I. N. D. Etude, “Simulation et Optimisation des performances d ' un  
système hybride intégrant des Energies renouvelables pour la génération d ' E lectricité  
Remerciements,” 2016.
- [8] “Qu'est-ce que le forage géothermique ? | Drill-i.” [https://drill-i.com/quest-ce-que-le-  
forage-geothermique/](https://drill-i.com/quest-ce-que-le-forage-geothermique/) (accessed Apr. 08, 2021).
- [9] “4.L'énergie hydraulique - TPE 1°S : Les énergies renouvelables.”  
[https://sites.google.com/site/tpe1slesenergiesrenouvelables/fonctionnement-des-  
differentes-energies-renouvelables/l-energie-hydraulique](https://sites.google.com/site/tpe1slesenergiesrenouvelables/fonctionnement-des-differentes-energies-renouvelables/l-energie-hydraulique) (accessed Apr. 08, 2021).
- [10] “L'énergie houlomotrice : principe de fonctionnement | Hydrolienne, Haute tension,

- Energie.” <https://www.pinterest.fr/pin/180495897546361110/> (accessed Apr. 08, 2021).
- [11] “« La Biomasse : Composante de la Transition Energétique », au centre d'un Workshop en marge du SIAM – Fédération de l'Energie.” <https://www.fedenerg.ma/2018/04/29/la-biomasse-composante-de-la-transition-energetique-au-centre-dun-workshop-en-marge-du-siam/> (accessed Apr. 08, 2021).
- [12] “Avantages et inconvénients des énergies renouvelables.” <https://www.greenwatt.fr/avantages-et-inconvenients-des-energies-renouvelables/> (accessed Mar. 13, 2021).
- [13] B. Braham, M. M. Mohammedi, and M. Khelif, “الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية العالي” UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- جامعة-عنابة مختار باجي جامعة-عنابة ANNABA FACULTE : Sciences de l'Ingéniorat DEPARTEMENT : Électrotechnique MEMOIRE DE MASTER DOMAINE : Sciences et Technologies FILIERE : Électrotechnique OPTION : Etude et simulation d'une chaine de production .photovoltaïque.”, Juin 2018
- [14] “HAB'T ARCHITECTURE.” <https://www.abt-archi.com/maison.php?modele=AGENCE&sub=ENVIRONNEMENT&type=SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE> (accessed Apr. 08, 2021).
- [15] E. T. De, L. A. Technologie -Mohamed Boudiaf-Oran, F. De, G. Electric Department D', and L. Thèse, “MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE UNIVERSITÉ DES SCIENCES Mr BENMESSAOUD MOHAMMED TARIK SYSTÈME D'ÉNERGIE HYBRIDE PV-SOFC.”,2018.
- [16] C. Cea, “I . Production De L ' Énergie,” *Clefs CEA*, vol. 61, pp. 12–53, 2013.
- [17] “SYSTEME DE PRODUCTION D'ENERGIE SOLAIRE PV/DIESEL A LA STATION DE POMPAGE DE NAKALGO.” [Online]. Available: [www.2ie-edu.org](http://www.2ie-edu.org) ,Mars 2013
- [18] “Les différents types de technologies photovoltaïques - Ooreka.” <https://panneau-solaire.ooreka.fr/astuce/voir/732473/les-differents-types-de-technologies-photovoltaïques> (accessed Mar. 31, 2021).

- [19] “Principe et technologie photovoltaïque — Guide de l’Installation Electrique.” [https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Principe\\_et\\_technologie\\_photovoltaïque](https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Principe_et_technologie_photovoltaïque) (accessed Mar. 31, 2021).
- [20] M. Gérard, “L ’ énergie solaire photovoltaïque ( PV ) : une filière compétitive en site isolé,” pp. 1–10, 2016.
- [21] “L’énergie solaire photovoltaïque (PV) : une filière compétitive en site isolé | Encyclopédie de l’énergie.” <https://www.encyclopedie-energie.org/lenergie-solaire-photovoltaïque-pv-une-filiere-competitive-en-site-isole/> (accessed Apr. 08, 2021).
- [22] “Les différentes architectures du solaire photovoltaïque | solaire-offgrid.com.” <http://www.solaire-offgrid.com/le-solaire-et-ses-applications/architectures-solaire-photovoltaïque/> (accessed Apr. 08, 2021).
- [23] “Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques - Energie Plus Le Site.” <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaïque6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaïques/> (accessed Apr. 08, 2021).
- [24] P. D. E. Fonctionnement, “Guide de montage d ’ un système solaire autonome.”,pp. 4-6
- [25] U. F. A. –SETIF1-U. (ALGERIE)UNIVERSITE F. A. –SETIF1-U. (ALGERIE) Mr. MAHAMMEDI Abdellatif, “Etude et optimisation d’un système hybride éolien-photovoltaïque.”,2014.
- [26] “Les aventures de Rafale - Documentaire sur les éoliennes.” <https://www.environnement.gouv.qc.ca/jeunesse/chronique/2016/1602-documentaire-sur-les-eoliennes.htm> (accessed Apr. 08, 2021).
- [27] “Comment ça marche : énergie éolienne.” <https://www.lemoniteur.fr/article/comment-ca-marche-energie-eolienne.707314> (accessed Apr. 08, 2021).
- [28] “Présentation énergie éolienne.” <https://fr.slideshare.net/ImeneImene2/prsentation-nergie-olienne> (accessed Apr. 08, 2021).
- [29] M. Brucker and J. Michel, “LERMAB : Laboratoire d’Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois 186, rue de Lorraine-54400 Cosnes et Romain CONTRIBUTION A LA MODELISATION ET A L’OPTIMISATION DE SYSTEMES ENERGETIQUES MULTI-SOURCES ET MULTI-CHARGES.”

- [30] “Le principe de fonctionnement d'une éolienne TPE 1ere S3 2015/2016 Lycée Galilée.” [http://grvtsp.fr/tpe/eol\\_prcp.html](http://grvtsp.fr/tpe/eol_prcp.html) (accessed Apr. 08, 2021).
- [31] “10 Composants modernes d'éolienne | Download Scientific Diagram.” [https://www.researchgate.net/figure/Composants-modernes-deolienne\\_fig4\\_330225602](https://www.researchgate.net/figure/Composants-modernes-deolienne_fig4_330225602) (accessed Apr. 08, 2021).
- [32] “1: Structure d'une nacelle d'éolienne à axe horizontale. | Download Scientific Diagram.” [https://www.researchgate.net/figure/Structure-dune-nacelle-deolienne-a-axe-horizontale\\_fig61\\_315112445](https://www.researchgate.net/figure/Structure-dune-nacelle-deolienne-a-axe-horizontale_fig61_315112445) (accessed Apr. 08, 2021).
- [33] M. Boudiaf *et al.*, “( COMMANDE D'UNE GENERATRICE POUR ENERGIE EOLIENNE).”,2013.



## Chapitre II

# Les systèmes hybrides photovoltaïque-éolienne dans un site isolé

## Introduction

La plupart des régions isolées utilisent les générateurs diesel comme principale source de génération d'électricité. Les prix des carburants augmentent en fonction de l'éloignement. Des recherches approfondies ont été menées sur la conception, l'optimisation, le contrôle et l'exploitation des systèmes d'énergies renouvelables hybrides[1]. La combinaison d'éoliennes, d'énergie photovoltaïque ou de petites centrales hydroélectriques et d'autres sources d'énergie renouvelables peut compléter ou remplacer les générateurs diesel habituellement utilisés pour produire de l'électricité dans les régions isolées. Les systèmes énergétiques hybrides sont habituellement destinés à satisfaire les besoins énergétiques allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages ou de petites îles. L'utilisation de plusieurs sources d'énergie renouvelables dans un système énergétique hybride doit avoir un impact bénéfique sur la production d'énergie en termes de coût et de disponibilité et du concept écologique[1].

## II. Système hybride (SEH)

Le terme «**système d'alimentation hybride**» représente un système de génération d'énergie à sources multiples. Il s'agit de systèmes complexes qui combinent différentes sources d'énergie renouvelables ou sources d'énergie conventionnelles (générateurs diesel, etc.), différents éléments de stockage et différentes charges. Ils compensent l'intermittence des énergies renouvelables et offrent une meilleure efficacité énergétique globale [2]. Tout d'abord, le système énergétique hybride peut être connecté au réseau électrique ou autonome, puis la production d'énergie hybride peut être centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. Le raccordement de la source d'énergie hybride au réseau doit être conforme à certaines normes, qui ne sont pas forcément applicables dans le domaine des énergies renouvelables. Par conséquent, cela est possible dans des sites isolés où il n'y a pas de réseau et, dans la plupart des cas, une autonomie totale est nécessaire pour les systèmes hybrides[2]. Dans le but de résoudre le problème des énergies renouvelables (Puissance électrique obtenue est variable et dépend des conditions climatiques), le couplage entre différentes sources d'approvisionnement forme ce que l'on appelle un système énergétique hybride. Le SEH est donc une installation qui combine différentes technologies (énergie renouvelable, énergie conventionnelle, pile à combustible...) pour produire de l'électricité, afin de combiner les avantages de chaque système et fournir un rendement énergétique global plus élevé. Par exemple, les sources d'énergie renouvelables

telles que le photovoltaïque et les éoliennes ne peuvent pas fournir une puissance constante en raison de leur caractère aléatoire. Cependant, la combinaison de celles-ci avec d'autres sources permet d'obtenir une production d'énergie soutenue[3].

### II.1 Mission des systèmes d'énergie hybrides

Le rôle d'un système hybride est d'approvisionner une charge en énergie demandée, de produire le maximum d'énergie à partir des sources de production d'énergie renouvelable utilisée, tout en assurant une bonne qualité de l'énergie. La performance et le rendement d'un système hybrides sont affectés par plusieurs facteurs, tel que le dimensionnement des composants, l'architecture le type de composants, etc., ainsi que le choix de la stratégie de fonctionnement , l'hybridation permet de :

-Lisser la puissance délivrée par la source d'énergie. Exemple, l'absorption de pics aléatoires de puissance positive ou négative générés par la charge (phases d'accélération ou de freinage des véhicules électriques, etc.). En d'autres termes, il est généralement possible de fournir une puissance supérieure à la puissance moyenne du générateur ou de récupérer de l'énergie pour charger la source d'alimentation.

-Pendant une durée limitée, il est possible de palier une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie, pendant le démarrage d'une pile à combustible, ou lorsque le soleil est masqué par des nuages devant le générateur photovoltaïque ou en l'absence de vent[4].

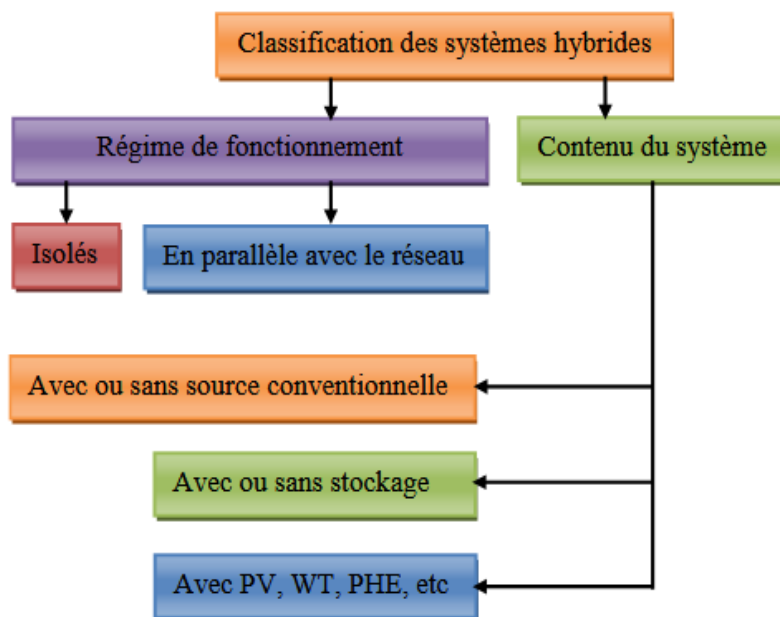


Figure II- 1 Classification des systèmes hybrides[6]

## II.2 Composants du système hybride

### II.2.1 Sources d'énergie renouvelable

L'énergie renouvelable est une énergie exploitable, inépuisable et gratuite. En d'autres termes, sa vitesse de formation doit être supérieure à sa vitesse d'utilisation. Le soleil est la source de nombreuses énergies renouvelables. Son propre rayonnement constitue une énergie exploitable. Ce rayonnement donne naissance également à d'autres formes d'énergie, de sorte que le cycle de l'eau produit l'hydroélectricité ainsi que l'énergie du vent (éolienne). La photosynthèse est également issue du soleil, qui produit différentes substances peuvent être utilisées vigoureusement mais qui ne sont pas toujours renouvelables. La chaleur intérieure de la terre est considérée comme une énergie géothermique renouvelable. La rotation des astres, le système Terre-Lune, produit des mouvements d'eau à la surface de la Terre qui peuvent être efficacement utilisés par l'énergie marémotrice[7].

### II.2.2 Systèmes de stockage

Le système de stockage est le facteur clé dans un système énergétique hybride indépendant (isolé). Dans la plupart des cas, les batteries restent la technologie la plus rentable. Ils sont généralement du type **plomb-acide**, les batteries au **nickel-cadmium** sont rarement utilisées ainsi que d'autres types de batteries. La technologie des batteries au plomb-acide bénéficie d'avantages tels que le faible coût (par rapport à d'autres technologies) et des avantages de maturité. La technologie est également largement disponible dans le commerce. Le stockage d'énergie est généralement utilisé dans les petits systèmes hybrides pour fournir une période de temps relativement longue (heures voire jours) pour la charge. Parfois, il est également utilisé avec SEH connecté à un grand réseau à courant alternatif (CA) isolé. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme[7].

### II.2.3 Système de supervision

La majorité des systèmes hybrides impliquent une forme de contrôle. Par exemple, les chargeurs de batterie incluent généralement un système de contrôle pour empêcher la batterie de se surcharger ou de perdre trop de puissance. Parfois, les contrôles sont intégrés individuellement dans chaque composant du système. Quelques exemples de contrôle intégré sont les régulateurs sur les moteurs diesel, les régulateurs de tension sur les générateurs diesel synchrones ou les commandes d'éoliennes. Un autre type de commande plus général permet de surveiller certains ou tous les composants. Le système de surveillance est généralement automatique. Les fonctions spécifiques peuvent inclure le

contrôle du démarrage et de l'arrêt des générateurs , l'ajustement du point de fonctionnement des générateurs, la charge des batteries et la distribution d'énergie pour différents types de charges[7].

## II.2.4 Convertisseurs

Différents réseaux électriques industriels alimentent un grand nombre d'actionneurs. Cette énergie se présente sous deux formes: alternative (tensions ou courants sinusoïdaux à valeur moyenne nulle) ou continue. Selon le type d'actionneur, il est nécessaire d'ajuster la forme d'énergie fournie par le réseau[8]

### II.2.4.1 Le convertisseur continu / alternatif

Également connu sous le nom **d'onduleur**, un dispositif électronique de puissance utilisé pour fournir une tension et un courant alternatifs à partir de sources d'énergie électrique directe continue. Il s'agit de la fonction inverse d'un redresseur, généralement utilisé comme source d'alimentation de secours avec d'autre convertisseur[9].

### II.2.4.2 Le convertisseur continu / continu

Aussi appelé **hacheur**, il assure la modification de la valeur de la tension d'une source à tension continue avec un rendement élevé. Utilisé pour **la variation de vitesse des moteurs à courant continu** dans des conditions de faible consommation d'énergie, ils constituent une partie importante des alimentations à découpage[9].

## II.2.5 Les charges

La charge électrique rend l'électricité utile. Il existe des charges résistives et inductives. Les charges résistives comprennent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau, etc. Les appareils qui utilisent des moteurs sont des charges résistives et des charges inductives. Ce sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges CC peuvent également avoir des composants inductifs, mais le seul effet qu'elles introduisent est les changements transitoires de tension et de courant lors des changements de fonctionnement du système[7].

## II.3 Architecture des systèmes hybride

Les générateurs du système hybride peuvent être connectés de différentes manières, qu'ils soient purement renouvelables, purement non renouvelables ou hybrides. Dans un système énergétique (SEH) constitué d'énergie renouvelable avec ou sans stockage [10]. Diverses ressources peuvent être utilisées dans SEH. Parmi ces ressources, on peut distinguer les systèmes suivants: photovoltaïque (PV), énergie éolienne, diesel, hydraulique, l'énergie

contenue dans l'hydrogène (piles à combustible), et les systèmes de stockage d'énergie. Ces systèmes peuvent également inclure d'autres composants tels que des convertisseurs statiques, des charges principales et des charges auxiliaires. Tous ces composants sont connectés à différentes architectures [3].

### II.3.1 Architecture à bus à CC

Dans un système hybride, la puissance fournie par chaque alimentation est concentrée sur le bus CC. Par conséquent, le système de conversion de courant alternatif CA fournit d'abord son alimentation au redresseur pour le convertir en courant continu CC. L'onduleur doit fournir la charge CA à partir du bus CC et doit suivre les réglages d'amplitude et de fréquence. La taille de la batterie et de l'onduleur peut fournir la charge [10].

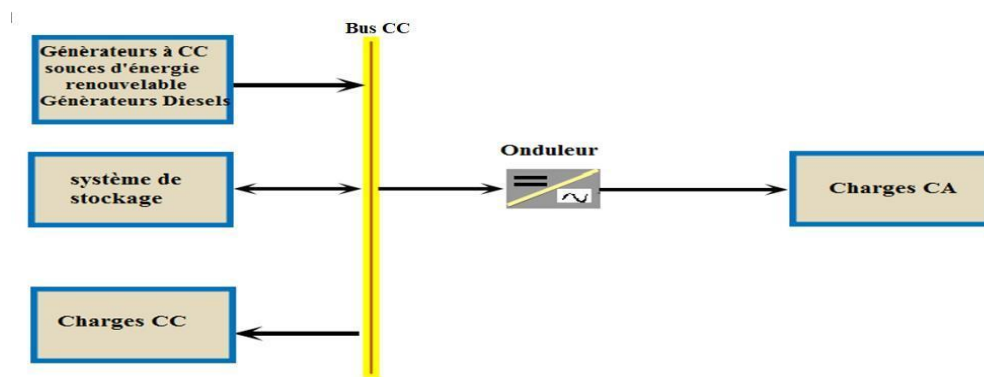


Figure II- 2 Configuration du Système Hybride à bus CC[10]

### II.3.2 Architecture à bus à CA

Une nouvelle méthode pour améliorer la modularité par couplage AC est proposée (toute l'énergie est concentrée sur un seul bus AC). À l'exception du groupe électrogène diesel, toutes les sources de production sont connectées au bus AC via un convertisseur, et le générateur diesel peut régler la fréquence du bus. Désormais, en couplant tous les utilisateurs et tous les générateurs du côté AC [7].

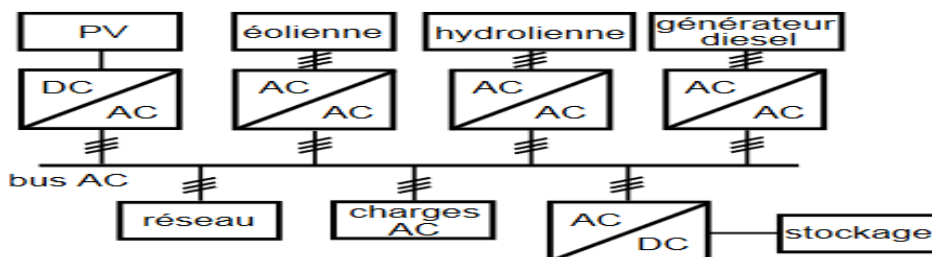


Figure II- 3 Configuration du Système Hybride à bus CA[7]

### II.3.3 Architecture mixte à bus à courant continu (CC)/courant alternatif(CA)

Par rapport à la configuration précédente, les deux configurations de bus CC et CA ont des performances plus élevées. Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelables peuvent alimenter directement une partie de la charge CA, améliorant ainsi l'efficacité du système. Le convertisseur situé entre les deux bus (redresseur et onduleur) peut être remplacé par un convertisseur bidirectionnel qui effectue une conversion CC / AC (fonctionnement de l'onduleur) en fonctionnement normal. A gauche, la batterie est chargée (utilisée comme redresseur). L'onduleur bidirectionnel peut fournir de l'énergie pour la charge de pointe[10].

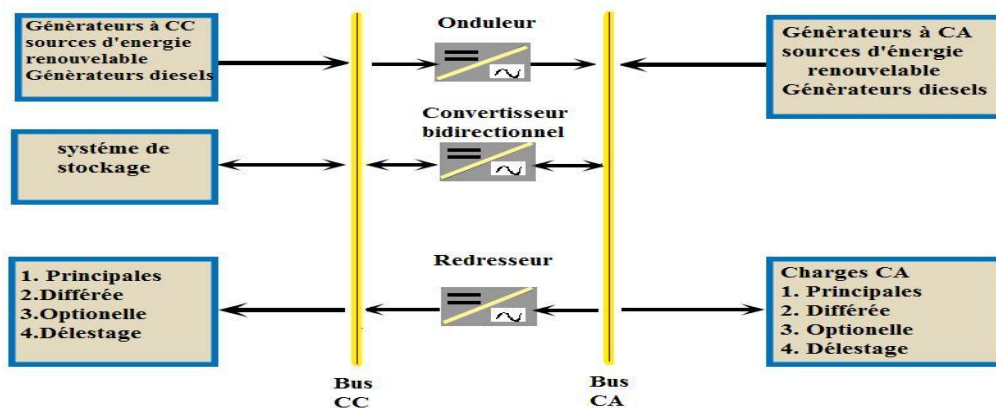


Figure II- 4 Configuration du Système hybride à deux bus à CC et à CA[10]

## II.4 Les différentes combinaisons des systèmes hybrides

### II.4.1 Système hybride photovoltaïque –éolienne-diesel

Les systèmes hybrides connectent l'énergie photovoltaïque et / ou éolienne à d'autres sources d'énergie. Habituellement, cela comprend les éoliennes et les générateurs de secours au diesel, au propane ou à l'essence. Ce système peut convenir aux bâtiments résidentiels ou commerciaux qui ne sont pas connectés au réseau de distribution La plupart des systèmes hybrides sont équipés de batteries[11].

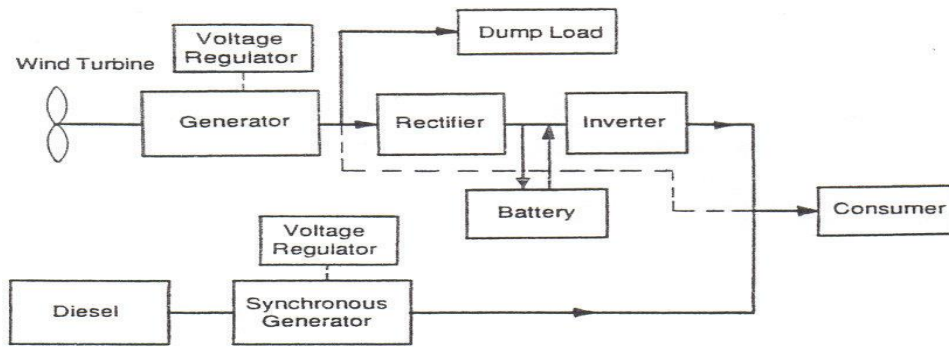


Figure II- 5 Système hybride photovoltaïque –éolienne-diesel[11]

### II.4.2 Système hybride photovoltaïque-batterie et piles à combustible

Le générateur diesel de ce système est remplacé par un système de pile à combustible[11].

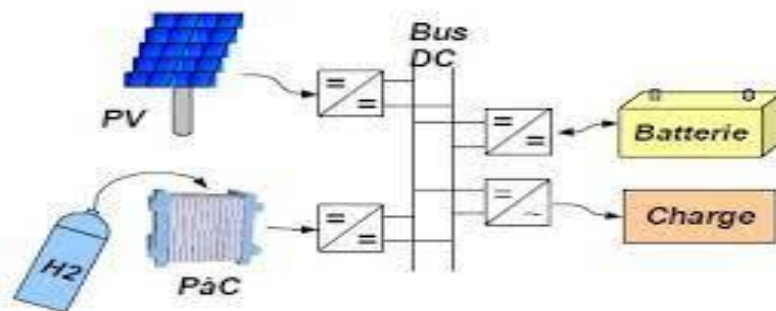


Figure II- 6 Système hybride photovoltaïque -batterie et piles à combustible[11]

### II.4.3 Système hybride photovoltaïque –éolienne

L'utilisation du stockage électrochimique pour optimiser l'énergie éolienne et photovoltaïque dépend largement du modèle économique de chaque système. Cette configuration se compose de deux sources d'énergie complémentaires (photovoltaïque et éolien) et d'une batterie [11].

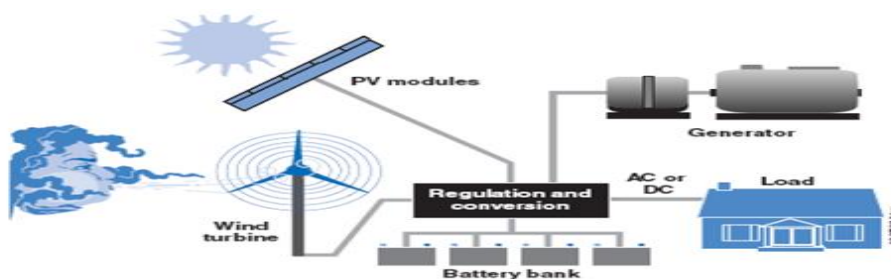


Figure II- 7 Système hybride photovoltaïque –éolien[11]



## II.5 Avantages et inconvénients d'un système hybride

### Avantages

- Ne repose pas sur une seule source d'énergie.
- Capable de répondre à la charge évolutive, Opération simple, réduisant l'entretien et la révision.
- Faibles coûts associés au cycle de vie de l'application[10].

### Inconvénients

- Comparé aux générateurs diesel, le coût en capital est élevé.
- Plus complexe qu'un système électrique isolé, nécessite un stockage par batterie et un conditionnement d'alimentation[10].

## II.6 Description du système hybrides photovoltaïque-éolienne

En raison de la consommation de ressources pendant la production, le système d'alimentation hybride présente un double avantage, qui peut minimiser les interférences avec l'environnement et sécurité d'approvisionnement, indépendamment de Conditions météorologiques. Il existe deux types de systèmes de production mixtes hybride, **des systèmes alternatifs** et des **systèmes alternatifs lignes parallèles**[12]. **Le système alterné** qui est constitué d'un système éolien, d'un photovoltaïque et du groupe électrogène qui sont connectés via un système de commutation Trois mesures pour s'assurer qu'une action de fonctionnement est transférée d'une source à une autre (En fonction des conditions météorologiques de jour comme de nuit), d'autre part **le système parallèle** qui relie simultanément les deux sources (éoliennes, photovoltaïques) au pack batterie . Ainsi groupe électrogène intervient en secours dans les situation d'urgence (**lorsque la batterie est épuisée**), appliquer de manière à effectuer un fonctionnement parallèle des deux sources (**éolienne, photovoltaïque**) conçu pour l'alimentation d'un site isolé [12].

### II.6.1 Fonctionnement

La production énergétique hybride est celle qui combine et exploite plusieurs sources d'énergies. L'éolien et le photovoltaïque (sources d'énergie renouvelable), ne délivrent pas une puissance constante, ce qui impose l'utilisation d'un système de stockage. En plus des sources d'énergie renouvelable, le système hybride peut incorporer un système de distribution

à courant alternatif(CA), un système à courant continu(CC), un système de stockage, des convertisseurs de puissance, des charges et une option de gestion des charges ou un système de supervision. La majorité des systèmes hybrides classiques contiennent deux bus : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à courant alternatif ainsi qu'au système de distribution [13]. En couplant ces systèmes et en les associant à un dispositif de stockage de l'énergie, nous pouvons exploiter les avantages suivants : Exploitation du système sans interruption, préserver le surplus d'énergie produite par ce système et sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques[13].

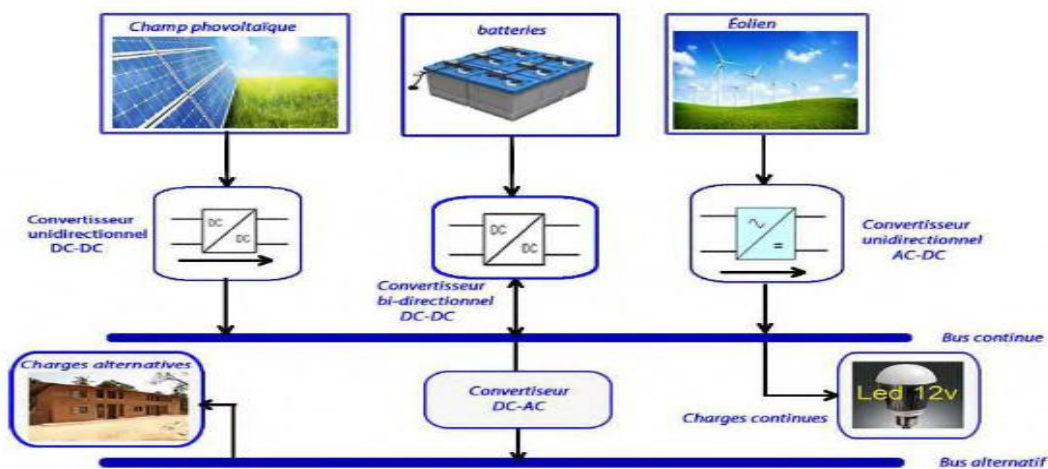


Figure II- 8 Schéma synoptique système hybride PV/Eolien[14]

## II.6.2 Principaux composants du système PV-éolien

### II.6.2.1 Générateur éolien-Photovoltaïque

Se compose de modules photovoltaïques et d'éoliennes. Fondamentalement, ils doivent fonctionner avec la même tension nominale de 12 ou 24 V et le même courant continu, Le règlement doit tenir compte que se sont deux courants de différentes nature : Une cellule photovoltaïque assez constante avec un seuil bas à Voir un aérogénérateur (éolien) qui est très variable. Par conséquent, le système de régulation sera responsable de faire fonctionner le système de générateur au meilleur point pour charger la batterie[15].

### II.6.2.2 Générateur photovoltaïque

Il est essentiellement composé de cellules photovoltaïques qui produisent de l'électricité lorsqu'elles sont exposés au rayonnement solaire. elles ne sont pas polluants, n'ont pas de

pièces mobiles, nécessitent peu d'entretien et ne produisent aucun bruit. Par conséquent, les cellules photovoltaïques sont un moyen sûr et écologique de produire de l'énergie[15].

### II.6.2.3 Générateur éolien (aérogénérateur)

Un dispositif communément appelé éolienne, qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique[16]. Le rotor utilise des profils aérodynamiques pour convertir l'énergie cinétique en énergie mécanique. Le flux d'air crée une poussée autour du profil, qui entraîne le rotor, tandis que la traînée constitue une force parasite. Ensuite, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice[17].

### II.6.2.4 Convertisseurs

Dans un Système d'énergie hybride, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Deux types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : **les onduleurs** et **les hacheurs**. Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil. Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources[7].

## II.7 Description du principe d'un système de stockage d'énergie

Les systèmes de stockage sont des composants indispensables dans un système distant (isolé). Correctement dimensionnés, ils participent à assurer l'autonomie du site, en établissant une réserve d'énergie en cas de sur production, et en restaurant cette réserve d'énergie en cas de sous-production temporaire, à long terme. Ils sont indispensables dans un système isolé pour garantir que l'équilibre énergétique du circuit électrique est toujours maintenu. Réellement, le principe de conservation impose qu'en plus des pertes, la puissance générée par l'alimentation électrique corresponde également à la somme de la puissance consommée par l'utilisateur et de la puissance absorbée par le système lui-même. À tout moment, il est très peu probable que la puissance générée coïncide avec la puissance consommée. Les différences ne peuvent être absorbées que par les réseaux connectés à

d'autres sources ou utilisateurs pour équilibrer l'équation, il doit y avoir une solution de stockage pour assurer cet équilibre, modifiant ainsi l'énergie interne du système[18].

### II.7.1 Les différents technologies de stockage de l'énergie électrique

Le stockage de l'énergie consiste à réserver une quantité d'énergie dans un dispositif, afin de l'utiliser plus tard. L'opération de stockage est toujours accompagnée son inverse qui consiste à restituer l'énergie stockée en cas de besoin . Passent généralement par l'intermédiaire d'une autre forme d'énergie, notamment : énergie potentielle, énergie cinétique, énergie chimique, énergie de compression, énergie thermique, que l'on accumule, ensuite reconvertit en électricité. Les techniques de stockage d'électricité se distinguent en plusieurs catégories, notamment: Super-condensateurs, Volants d'inertie, Batteries (Plomb, Nickel, Lithium)[19].

#### II.7.1.1 Les Super-condensateur

Le principe de fonctionnement d'un super-condensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension entre les deux électrodes, une double couche électrique se crée aux deux interfaces électrode-électrolyte et sépare les deux corps. Ainsi, l'énergie est stockée sous forme électrostatique . Les super-condensateurs ont un rendement de l'ordre de 95%, une durée de vie de l'ordre de 8 à 10 ans, une autodécharge de l'ordre de 5 % par jour et une capacité se situant entre 0,1 et 5000 F. On les utilise généralement pour la fonction de démarrage dans le domaine du transport[19].

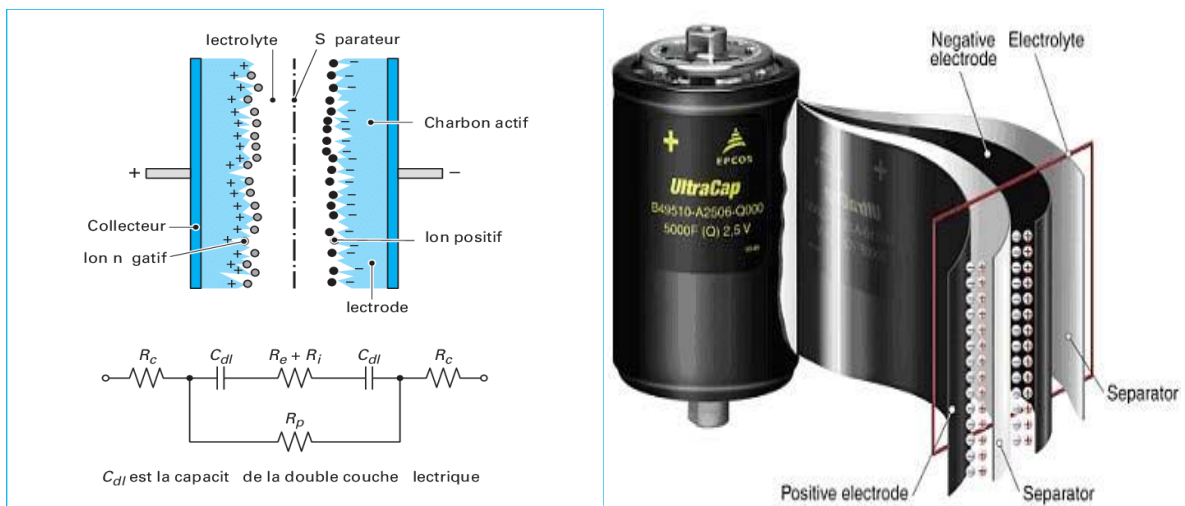


Figure II- 9 Schéma équivalent d'un super-condensateur[20][21]

### II.7.1.2 Les Volants d'inertie

Les volants d'inertie constituent des moyens de stockage dont le principe est basé sur la conversion et le stockage de l'énergie électrique sous forme d'énergie mécanique (énergie cinétique). L'énergie électrique est utilisée pour faire tourner le volant (masse) entraîné par la machine électrique (en fonctionnement moteur) à des vitesses très élevées (entre 8000 et 16000 tour/min). L'énergie électrique est alors stockée sous forme d'énergie cinétique. Pour restituer cette énergie stockée, la machine électrique est entraînée par le volant d'inertie et fonctionne en mode générateur[19].

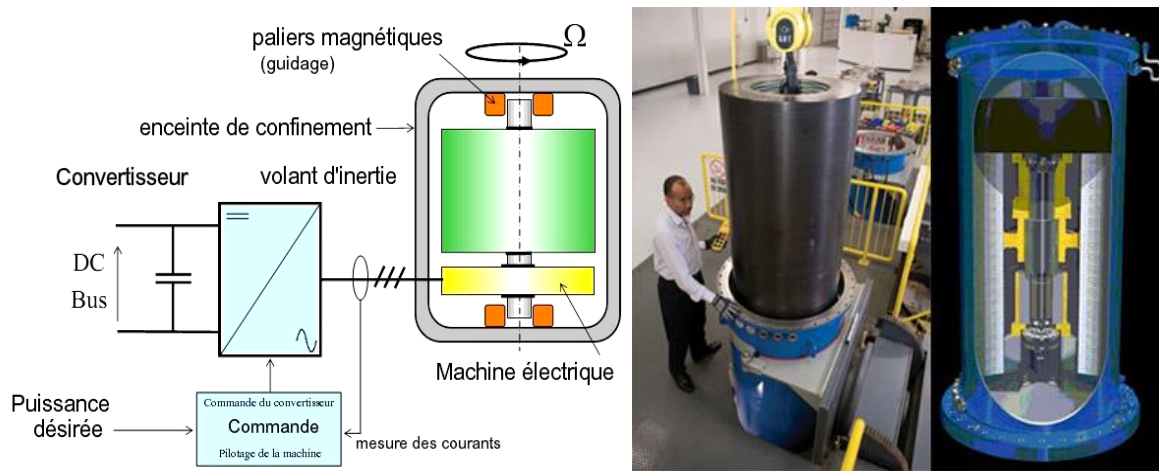


Figure II- 10 Volant d'inertie[22][23]

### II.7.1.3 Les Batteries

Une batterie est constituée d'accumulateurs électrochimiques associés en série et/ou en parallèle. Un accumulateur est un système électrochimique qui permet la conversion d'énergie chimique stockée en électricité de manière réversible. Il constitue deux électrodes une positive et l'autre négative immergées dans un électrolyte. Différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques sont classées en fonction de la nature des électrodes et de l'électrolyte, les plus utilisées sont : **plomb-acide**, **nickel-cadmium**, **lithium-ion** et **nickel-hydrure métallique**. Le principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique est le suivant : En mode décharge, à travers des réactions d'oxydoréductions, l'accumulateur convertit l'énergie chimique stockée en énergie électrique (générateur d'énergie électrique). Les électrodes libèrent des ions, qui migrent dans l'électrolyte, permettant aux électrons de passer à travers un circuit externe pour maintenir la neutralité électrique. En effet, une réaction d'oxydation se produit au niveau de l'anode (électrode négative en décharge), et les

électrons libérés au niveau de l'anode traversent le circuit externe vers la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère la réaction de réduction, le phénomène s'inverse durant la charge. L'accumulateur fonctionne en récepteur d'énergie électrique[19].

### II.7.1.3.1 Les batteries au plomb

L'électrolyte d'un accumulateur au plomb-acide ( P-Ac ) est une solution aqueuse d'acide sulfurique, sa cathode est constituée d'oxyde de plomb (  $PbO_2$  ) et son anode de plomb, on utilise pour cette technologie une électrode en plomb et une électrode en dioxyde de plomb

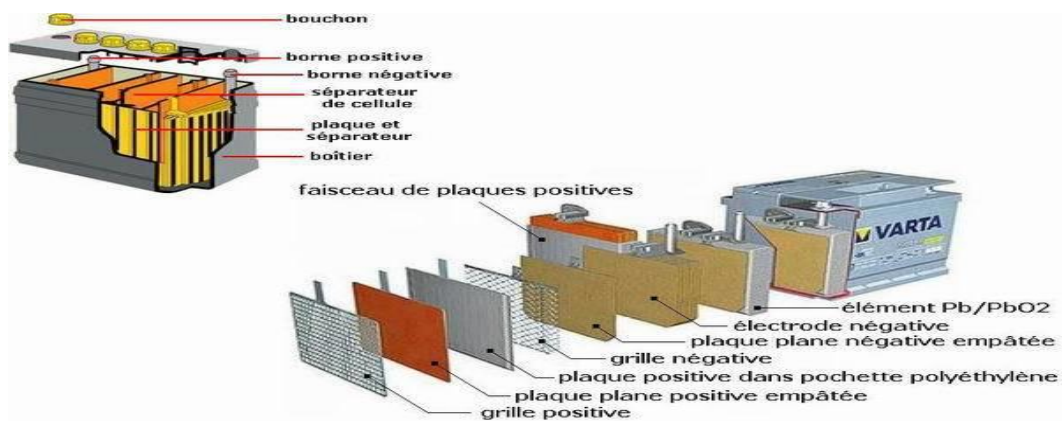


Figure II- 11 Schéma accumulateur plomb acide[24]

plongée dans un électrolyte d'acide sulfurique. La batterie au plomb est l'une des batteries qui a le plus mauvais rapport énergie/masse (35 Wh/kg). Cependant, elle est capable de fournir de forts appels de courant de décharge, c'est pour cela qu'elle est majoritairement utilisée pour le démarrage électrique des moteurs à combustion interne, très économique et facile à produire. C'est une technologie mature et bien connue, elle possède une faible densité énergétique et son temps de recharge est assez lent, contient des métaux lourds et de l'acide sulfurique qui peut être dangereux et peut être source de pollution. Sa durée de vie est fortement dépendante de la température à laquelle on l'utilise (divisée par deux pour une augmentation de 10°C)[25].

### II.7.1.3.2 Les batteries nickel-cadmium (NiCd)

Sont composées d'électrodes en oxyhydroxyde de nickel et en cadmium. L'électrolyte est alcalin. Bien que dépassées par les batteries NiMH, elles-mêmes aujourd'hui concurrencées par les batteries Li-ion, les batteries NiCd sont aussi bien maîtrisées et robustes. Elles supportent bien les décharges complètes et sont même préconisées pour améliorer leur durée de vie. Cette technologie a l'avantage de pouvoir se recharger simplement et rapidement,

même après une longue période de stockage. En revanche, la batterie s'autodécharge assez rapidement (de l'ordre de 20% par mois) et possède une assez faible densité énergétique. Elle est soumise à l'effet mémoire qui dégrade sa durée de vie si la recharge n'est pas effectuée dans des conditions optimales[25].

### II.7.1.3.3 Les batteries Nickel-Hydrure Métallique

Dans les batteries nickel-hydrure métallique ( Ni-MH ), l'électrode négative est constituée d'un alliage d'hydrure métallique. L'électrode positive est à base d'oxyhydroxyde de nickel capable d'absorber l'hydrogène, en utilisant une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) comme électrolyte. L'électrode négative est différente de la batterie nickel-cadmium, le matériau actif de cette dernière est composé d'un alliage d'hydrure métallique MH. Présentent de nombreux avantages, tels que: une densité d'énergie plus élevée, un faible coût, un fonctionnement possible à basses températures et une bonne fiabilité de fonctionnement, elles permettent de surmonter les problèmes liés à la toxicité du cadmium. Comme pour les batteries nickel-cadmium, elles utilisent des accumulateurs de tension nominale définie à 1,25 V. les énergies massique et volumique varient respectivement dans une plage de 65 à 90 Wh/kg et de 210 à 350 Wh/L, quant à la densité de puissance, elle peut atteindre 200 W/kg. L'auto décharge des accumulateurs Ni-MH peut atteindre 4 à 5 % par jour quand ils sont pleinement chargés, puis 1 à 2 % par jour lorsqu'ils sont partiellement déchargés. Les batteries Nickel-Hydrure Métallique ont de bonnes caractéristiques de puissance d'impulsion et sont largement utilisées dans les véhicules électriques et hybrides depuis plusieurs années[19].



Figure II- 12 Accumulateurs nickel-cadmium[26] et nickel-hydrure métallique[27]

#### II.7.1.3.4 Les batteries lithium-ion

Pour les batteries Li-ion, l'électrolyte est composé d'une solution d'hexafluorophosphate de lithium ( $\text{LiPF}_6$ ) dans un mélange de solvants organiques, et l'électrode positive est composée d'oxydes de métaux de transition ( $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  ou  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) et l'électrode négative de carbone graphité ( $\text{LiC}_x$ ), leur utilisation a exponentiellement progressé grâce à leurs très bonnes performances, en termes de densités, de rendement et de durée de vie, elles sont moins toxiques pour l'environnement, mais leur prix reste élevé. Cependant cette limitation, les batteries au lithium-ion occupent la quasi-intégralité du marché de téléphonie mobile et sont également utilisées dans les applications aérospatiales et de forte puissance. Elles sont considérées comme adaptées aux applications éoliennes, photovoltaïques et hydroélectriques [19]. Cette technologie possède une densité d'énergie élevée et une faible autodécharge et n'est pas soumise à l'effet mémoire, les conditions de recharges sont donc moins contraignantes pour préserver leur durée de vie. En revanche, elles peuvent être sujettes à des problèmes de sécurité, les batteries peuvent prendre feu sous l'effet d'un court-circuit ou même exploser et supportent très mal les décharges profondes. Ces batteries doivent donc toujours être équipées d'un circuit de protection appelé BMS (Battery Management System)[25].

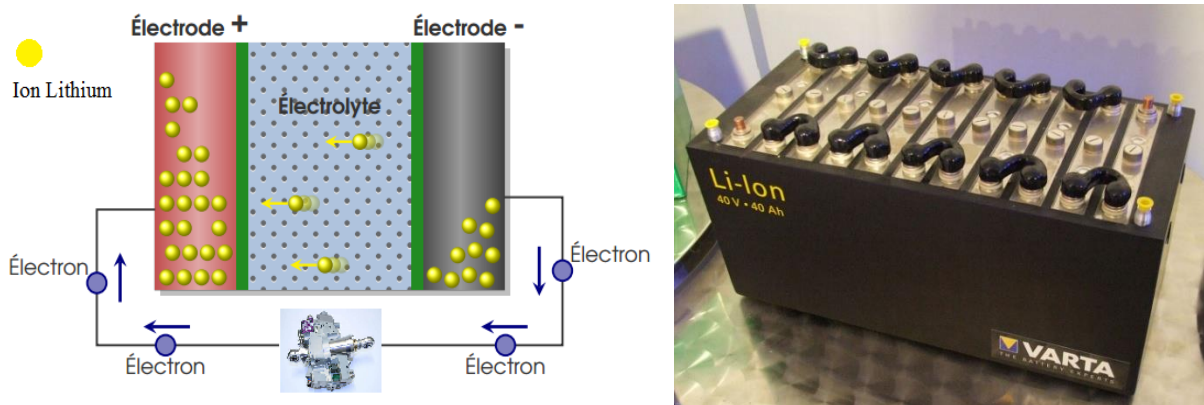


Figure II- 13 Accumulateur Electrochimique Lithium-ion[28]

#### II.7.2 Hybridation des unités de stockage en site isolé

L'existence d'une unité de stockage dans le système puissance du site isolé est essentielle pour assurer deux fonctions vitales: En période de très faible production, l'autonomie à moyen terme du site et la différence entre la puissance générée par le stockage ou le déstockage et la puissance consommée à la fois pour atteindre le bilan énergétique pour une utilisation en site isolé par un particulier, Les batteries sont la solution idéale pour assurer l'autonomie énergétique



sur plusieurs **jours**. Pourtant, leur puissance spécifique est très faible, ce qui amène les gens à se demander ce qui se passe lorsque la production ou la consommation culmine. Si la valeur de crête se situe dans une plage de fréquences suffisamment basse, la batterie peut absorber la valeur de crête, entraînant une charge ou une décharge à courant élevé. La durée de vie de la batterie dépend du nombre de ses cycles de charge et de décharge, et des phénomènes chimiques irréversibles se produiront lors de son utilisation, ce qui réduira progressivement sa capacité. Cependant, plus le courant utilisé pour la charge ou la décharge est fort, plus le taux de dégradation est rapide. Les pics de puissance devraient se produire très régulièrement, ce qui limitera considérablement la durée de vie de la batterie à long terme. Si la plage de fréquences couverte par le pic est trop grande pour être «visible» par la batterie, la capacité interne du système d'alimentation les absorbera, ce qui entraînera une saturation et une perte du circuit[18].

### II.7.3 Choix de Système de puissance hybride et de stockage

L'hybridation comprend la combinaison de plusieurs unités d'énergie et de stockage dans un système pour optimiser la production et la gestion de l'énergie. Dans ce cas, on peut dire qu'il s'agit d'un système d'alimentation hybride ou d'un système multi-source et multi-stockage. nous avons retenu les éoliennes et les panneaux photovoltaïques pour leur maturité technologique, qui peuvent convenir aux petits systèmes électriques et à la miniaturisation, ainsi qu'à des raisons de facilité d'entretien personnel. Pour un site rural isolé, le moyen de stockage utilisé devra respecter certaines contraintes telles que : un bon rapport coût/performance, une grande fiabilité, une bonne sécurité, accordée à la technologie de stockage la moins toxique pour l'environnement, ayant une très bonne performance en termes de densité, de rendement et de durée de vie[25].. Il faut donc étudier les différents modes de couplage qui peuvent exister entre eux, mais par contre étudier différents convertisseurs de puissance capables de les adapter à ce couplage[18].

### II.8 Choix du type de bus couplage mixte CC/AC

Dans le cas d'un site isolé, la bonne solution sera l'association du bus continu au bus alternatif par couplage mixte . Parmi les sources et unités de stockage que nous avons présentées, les panneaux photovoltaïques fonctionnent à puissance continue. Les éoliennes fonctionnent en alternatif. Enfin, la ou les charges peuvent selon les cas être continues ou alternatives. Cette solution permet de connecter chacun au bus qui lui correspond, puis d'échanger la puissance entre les bus au moyen de convertisseurs CC/AC réversibles. Ainsi affranchis des contraintes de forme d'onde, les stockages continus peuvent gérer plus efficacement l'énergie du système

grâce à des convertisseurs CC/CC, et le traitement de la puissance photovoltaïque est simplifiée. La mise en forme des puissances éolienne restent délicates en AC/AC, car les variations de production peuvent toujours provoquer des creux de tension et variation de fréquence. Ensuite, la solution peut être de les transmettre au bus CC et de les traiter avec une conversion AC / CC, le seul problème restant est de maintenir l'amplitude du bus [18].

### II.8.1 Choix des convertisseurs de puissance

Plusieurs architectures ont été proposées pour les systèmes à multi-sources éolien /photovoltaïque, associer aux différents modes de couplage traiter précédemment. Pour chacune, le but sera de maximiser la production de puissance des sources. Ainsi, chaque contrôleur est connecté à un convertisseur de puissance, qui contrôle son point de fonctionnement et le connecte au bus commun avec les ajustements nécessaires, Dans les systèmes en site isolé, il n'y a plus lieu d'avoir un bus AC. Il ne reste que la structure autour du bus CC, avec éventuellement un onduleur pour connecter la charge si elle est alternative, Une conversion AC/CC permet d'adapter la forme d'onde produite par la génératrice de l'éolienne au bus CC. Pour une tension du bus imposée, elle n'a pour seul objectif de régler le point de fonctionnement de l'éolienne. Deux solutions sont alors possibles : l'onduleur MLI fonctionnant en inverse, permettant de n'utiliser qu'un seul convertisseur, ou l'association d'un redresseur non commandé et d'un hacheur, qui permet d'obtenir qu'une seule variable de commande à gérer. Quant aux panneaux photovoltaïques sont connectés à un hacheur pour ajuster la tension d'entrée et son point de fonctionnement en fonction de la tension appliquée à la borne de sortie, L'unité de stockage principale applique généralement la tension appropriée à laquelle le bus doit se conformer via un hacheur ou en la connectant directement à l'unité de stockage principale. le bus Dans le premier cas, la tension est maintenue à une valeur fixée, en comparaison de laquelle le système peut juger de l'état de charge de l'unité. Dans le second, la tension varie au gré des variations de charge de l'unité ; elle doit cependant rester suffisamment stable, par exemple être confinée dans un intervalle borné, afin de ne pas saturer les convertisseurs des autres modules [18].

## II.9 Stratégies de commande des sources

### II.9.1 Algorithmes MPPT pour panneaux photovoltaïques

Les panneaux suivent selon leur technologie une caractéristique puissance-tension ou puissance-courant possédant un unique maximum, et variant en fonction de l'irradiation, et de

la température, qui même mesurés ne permettraient pas de déduire efficacement ce dernier. La conception la plus simple pour évaluer leur point de fonctionnement maximal est de considérer la tension optimale correspondante proportionnelle à la tension de circuit ouvert évoluant au gré des fluctuations d'irradiation et de la même façon le courant optimal proportionnel au courant de court-circuit. Cependant cette méthode possède des défauts, d'une part de nécessiter un panneau supplémentaire pour mesurer la tension de circuit ouvert ou le courant de court-circuit à tout instant, et d'autre part d'avoir un rendement limité car les coefficients de proportionnalité dépendent alors de la température des cellules, qui peuvent être très variables[18].

### II.9.2 Algorithmes MPPT pour éoliennes

La problématique des algorithmes MPPT pour éoliennes est de trouver le point de fonctionnement de puissance maximale pour toute valeur de la vitesse du vent, malgré les fluctuations de celle-ci, sans pour autant la mesurer, La première solution consiste à appliquer les mêmes algorithmes en aveugle, extrêmes ou à logique floue, que pour les générateurs photovoltaïques, en utilisant la caractéristique puissance-vitesse de l'éolienne au lieu de puissance-tension ou puissance-courant des panneaux. Cependant, l'éolienne a pour avantage d'être caractérisable de façon fiable par la fonction  $C_p(\lambda)$  spécifique à sa turbine. C'est pourquoi la littérature fait couramment référence à des algorithmes MPPT cherchant à mener le point de fonctionnement au sommet de la cloche que forme cette fonction. Elle implique que la caractéristique puissance-vitesse possède un maximum, L'algorithme consiste ainsi à prendre pour référence de puissance en fonction de la mesure de la vitesse de rotation, cette référence peut ensuite être divisée par la mesure adéquate pour en déduire une référence de vitesse, couple, tension, ou courant[18].

### II.9.3 Commande des unités de stockage

D'un autre côté, lorsque les unités de stockage sont hybridées sont chacune associées à un convertisseur afin de contrôler la composante de la puissance devant être stockée ou déstockée qu'elles absorbent. L'objectif est de répartir le spectre de fréquence de cette puissance à stocker en plusieurs composantes à détourner vers les unités les plus aptes à les gérer. Plus la composante est dans les basses fréquences mais énergétique, plus l'unité réceptrice devra avoir une grande énergie spécifique et moins elle aura besoin de puissance spécifique. Inversement plus l'unité recevra de hautes fréquences, plus il lui faudra de puissance spécifique, souvent au détriment de l'énergie spécifique[18].

## **Conclusion**

À travers ce chapitre, nous avons présenté le système énergétique hybride, ainsi que donner un aperçu sur les éléments de sa composition et les différentes méthodes de production d'énergie électrique. Notre recherche se concentrera sur le système de production mixte déconnecté du réseau, qui est conçu pour alimenter des maisons isolées, soit dans l'alimentation électrique, soit dans l'unité de stockage: en fait, le système sera constitué d'un groupe de panneaux photovoltaïques ainsi qu'une éolienne domestique. D'un banc de batteries (batteries lithium-ion) et d'un banc de super condensateurs.

Le chapitre suivant aborde, la modélisation du système énergétique hybride pour les deux énergies photovoltaïque et éolienne et ses composants. Dans le but d'alimenter une zone isolée en énergie électrique.

## Bibliographie

- [1] P. M. KOUMBA and ÉTUDE, “Université du Québec à Trois-Rivières.”
- [2] F. D. E. Technologie, “مذكرة تخرج في موضوع: تحسين أداء توربينات الرياح باستخدام مصدر طاقة شمسية”, 2018  
Mémoire de Master Installation énergétique et turbomachines Thème : “Amélioration des performances d'un système éolien par l'introduction d'une source solaire”, 2018
- [3] F. Mentouri, “Présentée et soutenue par MADACI BOUTHAINA Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs,” 2018.
- [4] H. Oumaima, “Amélioration des performances des réseaux autonomes hybrides dans le nord du Québec Par,” 2020.
- [5] H. Ibrahim and J. Perron, “INVESTIGATIONS DES DIFFÉRENTES ALTERNATIVES RENOUVELABLES ET HYBRIDES POUR L'ÉLECTRIFICATION DES SITES ISOLÉS Rapport interne Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne,” 2008.
- [6] F. Des, S. D. E. La, O. Modelisation, E. T. Commande, and D. E. S. Machines, “ÉTUDE ET OPTIMISATION D'UN MULTI SYSTÈME HYBRIDE DE CONVERSION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE,” 2015.
- [7] M. D. E. Master, “Alimentation d'un site isolé par un système hybride (éolienne – diesel) Remerciement,” 2017.
- [8] I. Introduction, “I. Introduction redresseur.” pp. 1–13
- [9] A. Gradateurs and C. Redresseurs, “1. Définition,” pp. 1–2.
- [10] M. SADAoui Elias N. TAIB MEDDOURI Mustapha K. IDJDARENE, “Université Abderrahmane Mira-Bejaia Faculté de Technologie Département de Génie Électrique Spécialité : Electrotechnique Option : Commande des systèmes électrique Projet de Fin de cycle.”, 2012
- [11] U. M. Larbi Ben and elle M. KEBAILI Salima FADLOUN Fadila BELKADI Nawel, “REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Modélisation d'un système énergétique hybride (Photovoltaïque + Batterie) Proposé et dirigé : Présenté par,” 2009.
- [12] D. Rekioua, “Étude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien - diesel,” no. May, 2014.

- [13] Fartas Hafsia, “Etude, modélisation et simulation d’un système hybride autonome éolien-photovoltaïque ”, 2019
- [14] M. T. Vaïtchemé, *TÉMISCAMINGUE MODELISATION ET SIMULATION D ’ UN SYSTÈME DE STOCKAGE INTÉGRÉ DANS UN MICRO-RÉSEAU MÉMOIRE PAR MARTIN TAÏKI VAÏTCHEMÉ Juin 2019 Mise en garde.* 2019.
- [15] F. Boumediene, “Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d’électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah,” *Mémoire de Magister*, p. 152, 2012.
- [16] B. Aissa, “Modélisation et commande des génératrices éoliennes,” pp. 1–16, 2008.
- [17] C. W. Pereira, “L ’ énergie éolienne Principe de développement viable,” 2006.
- [18] L. Croci, “Gestion de l ’ énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries / supercondensateurs Lila Croci To cite this version : HAL Id : tel-00943296 AVEC STOCKAGE HYBRIDE BATTERIES / SUPERCONDENSATEURS,” *THESE Pour l’obtention du grade DOCTEUR L’UNIVERSITE POITIERS*, p. 279, 2013.
- [19] A. Hypolite and J. Hounnou, “Dimensionnement optimal d ’ un système hybride hydroélectrique-photovoltaïque-stockage pour une alimentation rurale isolée Amèdedjihunde Hypolite Jordão Hounnou To cite this version : HAL Id : tel-02967644 Dimensionnement optimal d ’ un système hybride hy,” 2020.
- [20] “Schéma équivalent d’un supercondensateur avec localisation des résistances | Download Scientific Diagram.” [https://www.researchgate.net/figure/Schema-equivalent-dun-supercondensateur-avec-localisation-des-resistances\\_fig1\\_264449919](https://www.researchgate.net/figure/Schema-equivalent-dun-supercondensateur-avec-localisation-des-resistances_fig1_264449919) (accessed Apr. 26, 2021).
- [21] “[PDF] Cours Supercondensateur - électronique de puissance.” <https://www.cours-gratuit.com/cours-electronique-de-puissance/cours-supercondensateur> (accessed May 05, 2021).
- [22] “Stockage de l’énergie électrique |.” [http://sti2d.ecolelamache.org/stockage\\_de\\_lnergie\\_lectrique.html](http://sti2d.ecolelamache.org/stockage_de_lnergie_lectrique.html) (accessed May 05, 2021).
- [23] “Roue à inertie.” <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiep/book/export/html/2429> (accessed May 05, 2021).
- [24] “Séquence 3 : Sciences de l’Ingénieur - Batterie d’accumulateurs.” [http://pedagogie.ac-limoges.fr/sti\\_si/accueil/FichesConnaissances/Sequence3SSi/co/S3B22\\_Association\\_m\\_odele\\_composant\\_40.html](http://pedagogie.ac-limoges.fr/sti_si/accueil/FichesConnaissances/Sequence3SSi/co/S3B22_Association_m_odele_composant_40.html) (accessed May 04, 2021).

- [25] I. Kravtsoff, “Optimisation d ’ un système hybride de génération d ’ énergie électrique permettant de minimiser la consommation et l ’ empreinte environnementale . To cite this version : HAL Id : tel-01331563 par ;,” 2016.
- [26] “Accu Ni-CD rechargeable batterie nickel cadmium nicad.” <https://www.jade-technologie.com/produits/accu-ni-cd-rechargeable-batterie-nicad/> (accessed May 05, 2021).
- [27] “Fischer Amps 9V NIMH Accu - 300mAh – Thomann Elláda.” [https://www.thomann.de/gr/fischer\\_amps\\_9v\\_nimh\\_akku\\_270\\_mah.htm](https://www.thomann.de/gr/fischer_amps_9v_nimh_akku_270_mah.htm) (accessed May 05, 2021).
- [28] “Vers une solution hybride.” <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiep/book/export/html/2427> (accessed May 04, 2021).

## Chapitre III

# Modélisation du système hybride photovoltaïque- éolienne



## Introduction

La modélisation permet une intervention mathématique basée sur l'expérience ou des observations. C'est l'élément de base du processus scientifique, notamment en physique. Elle permet de représenter des systèmes ou des phénomènes sous une forme simplifiée afin d'expliquer ou prédire certains aspects. Par conséquent, une modélisation doit être effectuée pour établir une relation directe entre l'énergie produite et la demande d'utilisation. Grâce à des recherches théoriques et expérimentales, l'adaptabilité du système à différentes périodes de l'année peut être estimée. Dans ce cas, nous allons tout d'abord introduire la modélisation des systèmes hybrides photovoltaïque-éolien et la modélisation des systèmes de stockage dans ce chapitre, car nous proposons de développer deux modèles mathématiques différents de systèmes de production d'énergie photovoltaïque et éolienne afin d'améliorer leur faisabilité opérationnelle, notamment la maîtrise des flux de capacité de production.

### III. Modélisation du générateur photovoltaïque

L'énergie produite par le générateur photovoltaïque est estimée sur la base des données d'irradiance totale sur la pente, la température ambiante et les données constructeur des modules photovoltaïques utilisés.

#### III.1 L'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque

$$E_{pv} = \eta_{ge} S_{pv} P_f H \quad (1)$$

Où:  $S_{pv}$  représente la surface totale du générateur photovoltaïque ( $m^2$ ),  $\eta_{gen}$  le rendement du générateur photovoltaïque et  $H$  l'irradiation solaire sur un plan incliné ( $kWh/m^2.mois$ ),  $P_f$  le facteur de remplissage du module égal à 0.9

#### III.2 L'efficacité (où le rendement) d'un générateur photovoltaïque

$$\eta_{gen} = \eta_r \{ 1 - \gamma (T_c - 25) \} \quad (2)$$

Où :  $\gamma$  représente le coefficient tenant compte de la variation du rendement du module photovoltaïque en fonction de la température, qui est pris à  $(0.0045 / ^\circ\text{C})$  et  $\eta_r$  le rendement de référence du générateur photovoltaïque.  $T_c$  est la température de jonction de la cellule.

### III.3 Modèle de la température de la cellule

Ce modèle suppose que la température de jonction de la cellule  $T_c$  ( $^\circ\text{C}$ ) est une fonction linéaire de la température ambiante  $T_a$  ( $^\circ\text{C}$ ) et de l'éclairement  $G$ .

$$T_c = T_a + \left( \frac{\text{NOCT}-20}{800} \right) G \quad (3)$$

D'où : **NOCT** est la température nominale de fonctionnement ( $^\circ\text{C}$ ) atteinte par les cellules dans les conditions suivantes  $T_a = 20^\circ\text{C}$ ,  $G = 800 \text{ W / m}^2$ , vitesse du vent  $1 \text{ m / s}$ , distribution spectrale **AM = 1,5**. L'intégration de MPPT peut simplifier le modèle de diode simple, n'obtenant ainsi qu'une équation empirique. Désormais, en utilisant uniquement les données climatiques de terrain (lumière du soleil et température ambiante) et les données du fabricant du module, nous pouvons connaître la puissance maximale disponible à la sortie du module PV. Par conséquent, la génération électrique du champ CC est directement proportionnelle à la génération du module photovoltaïque. Une multiplication de la puissance de sortie d'un module par le nombre de modules qui composent le générateur photovoltaïque est suffisante pour trouver la puissance totale qu'il fournit. Ce modèle ne prend pas en compte la perte de connexion entre les modules[1].

$$P_{MPPT} = N_{PV} \frac{G}{G_{\text{réf}}} [P_{0 \text{ max}} + \mu_{Pm}(T_c - T_{c \text{ réf}})] = N_{PV} P_{\text{max}} \quad (4)$$

Avec :

$G$ : Irradiation solaire globale du lieu considéré ( $\text{W/m}^2$ )

$G_{\text{réf}} = 1000$  ( $\text{W/m}^2$ ) : Irradiation solaire dans les conditions standard de référence

$P_{MPPT}$ : Puissance fournie par le champ PV (W)

$N_{PV}$  : Nombre de modules composant le PV

$P_{0 \text{ max}}$  : Puissance maximale du module dans les conditions standards (W)

$\mu_{Pm}$  : Coefficient de variation de la puissance en fonction de la température

$T_c$  : Température de jonction du module PV ( $^\circ\text{C}$ )

$T_{c\text{ réf}}$  : Température de jonction dans les conditions de références du module PV (25 °C)

$T_a$  : Température ambiante du lieu considéré (°C)

NOCT: Température de fonctionnement des cellules PV dans les conditions de références.

### III.3.1 Modèle électrique de la cellule PV

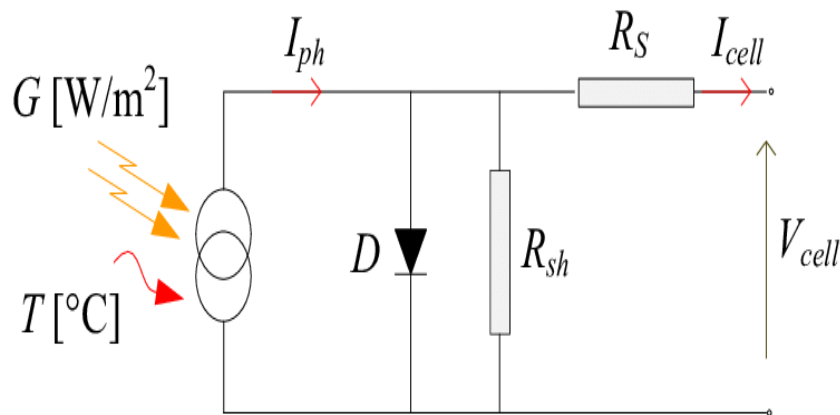


Figure III- 1 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque[2]

Une cellule solaire Photovoltaïque est une diode électronique PN de grande surface qui, exposée à la lumière (photons), génère une tension électrique (volts), une cellule photovoltaïque idéale peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode. En addition au modèle idéal, le modèle réel tient compte des propriétés résistives de la cellule qui sont modélisées par une résistance série  $R_s$  mais aussi des courants de fuites modélisés par une résistance shunt  $R_{sh}$  [3].

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad (5)$$

D'après la loi de Kirchhoff, le courant de sortie de la cellule est donné par:

$$I = I_{ph} - I_D \quad (6)$$

Le courant photonique est lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence par:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{réf}} I_{sc} T_c (1 + \alpha (T_c - T_{c\text{réf}})) \quad (7)$$

Le courant de la diode est donné par l'expression de Shockley

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left( \frac{q(V + I R_s)}{A K T_c} \right) - 1 \right\} \quad (8)$$

La résistance shunt est déduite par l'équation suivante

$$R_{sh} = - \frac{dV}{dI} V_{oc} T_c + \frac{A K T_c}{q I_{sc} T_c} \quad (9)$$

Le courant dans la résistance  $R_{sh}$  est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (10)$$

D'où

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V + R_s I}{A K T_c} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (11)$$

$G$  : représente l'éclairement de fonctionnement et  $G_{réf}$  l'éclairement normalisé

$\alpha$  : le coefficient de température du courant  $I_{ph}$  (mA/°C),

$A$  : le facteur d'idéalité de la jonction P-N,

$k$ , la constante de Boltzmann,  $1.381 \times 10^{-23}$  J/K,

$T_{c\text{réf}}$  : la température absolue de référence de la cellule,

$q$  : la charge d'un électron,  $1.602 \times 10^{-19}$  C

$V$  : la tension imposée aux bornes de la cellule

$I_0$  : le courant de saturation à l'obscurité

$I_{sc} T_c$  : le courant de court-circuit de la cellule à la température ambiante  $T_c$

$V_{oc} T_c$  : la tension du circuit ouvert à la température  $T_c$

Le modèle est basé sur le calcul des cinq paramètres de la fonction  $I = f(I, V)$  qui sont:  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  et  $A$ . Ces paramètres sont déterminés à partir des données qui sont: le courant de

court-circuit  $I_{cc}$ , la tension à circuit ouvert  $V_{co}$ , le courant  $I_m$  et la tension  $V_m$ , au point de puissance maximale  $P_m$  et les pentes au voisinage de  $V_{co}$  et de  $I_{cc}$ .

$$I_0 = \left( I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) \exp \left( q \frac{V_{co}}{A K T_c} \right) \quad (12)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_0 \left( \exp \frac{I_{cc} R_s}{A} - 1 \right) \quad (13)$$

Supposant que la résistance parallèle est infinie ( $R_{sh} = \infty$ )

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V + I R_s}{A K T_c} \right) - 1 \right] \quad (14)$$

### III.4 Modélisation du générateur éolien

#### III.4.1 Modèle du vent

Le vent est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à une dimension. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps. Elle sera modélisée, dans cette partie, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [3].

$$V(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047 t) + 2 \sin(0.2665 t) + \sin(1.2930 t) + 0.2 \sin(3.6645 t)$$

#### III.4.2 Energie cinétique du vent

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air,  $m$ , qui se déplace avec la vitesse  $v$  [4], l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (15)$$

$m$  : masse du volume d'air (en kg)

$v$  : vitesse instantanée du vent (en m/s)

$E_c$  : énergie cinétique (en joules) [5]

### III.4.3 Limite de Betz/Formule de Betz

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. L'allemand Albert Betz a démontré en 1919 que la puissance maximale récupérable est :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P_{\text{cinétique}} = \frac{8}{27} \rho S V^3 \quad (16)$$

$$P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad \text{lorsque } V_{\text{aval}} = \frac{1}{3} V_{\text{amont}} \quad (17)$$

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est ainsi fixé à  $\frac{16}{27}$ , soit environ 59,3 %. Ce chiffre ne prend pas en compte les pertes d'énergie occasionnées lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. Dans le cas d'une hélice de diamètre  $D$ , la limite de Betz est égale à :

$$P = 0,37 \frac{\pi}{4} D^2 V^3 \quad \text{d'ou} \quad P = 0,29 D^2 V^3 \quad (18)$$

La puissance fournie par un aérogénérateur est proportionnelle au **carré** des dimensions du rotor et au **cube** de la vitesse du vent. Nous savons que l'éolienne procure son énergie du vent, par conséquent, il existe une relation entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation, le couple et la puissance sur le rotor d'une éolienne [6].

### III.4.4 La puissance éolienne incidente du vent

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (19)$$

Où :  $\rho$  est la masse volumique de l'air en  $\text{kg/m}^3$  (air atmosphérique sec environ  $1,23 \text{ kg/m}^3$  à  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  et à pression atmosphérique  $1,0132 \text{ bar}$ ),  $S$  la surface traversée par l'air ( $S = \pi R^2$ ) en  $\text{m}^2$ ,  $R$  le rayon du rotor de l'éolienne (rayon de l'hélice) et  $V$  la vitesse du vent en m/s.

#### III.4.4.1 Coefficient aérodynamique de puissance $C_p$

Cependant, le dispositif de conversion extrait une puissance  $P_{\text{éol}}$  inférieure à la puissance incidente  $P_v$ , à cause de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur. On définit alors, le coefficient de puissance de l'aéromoteur par la relation [4] :

$$C_p = \frac{P_{\text{éol}}}{P_v} \quad C_p < 1 \quad (20)$$

#### III.4.4.2 La puissance fournie par le rotor de l'éolienne

$$P_{\text{éol}} = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_p = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p \quad (21)$$

$C_p$  : Coefficient qui dépend de la forme du rotor et de la vitesse du vent, On peut estimer la valeur maximale de ce coefficient, donc la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne, en s'appuyant sur la théorie Rankine - Froude de l'hélice dans un fluide incompressible. C'est la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée la limite de Betz (théorie de Betz années 1920) du coefficient de puissance [4].

$$C_{p_{\text{max}}} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (22)$$

#### III.4.4.3 La vitesse spécifique ( Paramètre de rapidité )

La valeur du coefficient aérodynamique de puissance  $C_p$  dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ , donc  $C_p = C_p(\lambda)$  [4]. Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (spécifique)  $\lambda$  qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit:

$$\lambda = \frac{R \Omega}{V} = \frac{U}{V} \quad (23)$$

#### III.4.4.4 L'équation analytique de $C_p$ en fonction de $\lambda$

$$C_p = 0.043 - 0.108 \lambda + 0.146 \lambda^2 - 0.0602 \lambda^3 + 0.0104 \lambda^4 - 0.0006 \lambda^5 - 2.2 \cdot 10^{-6} \lambda^6 \quad (24)$$

Résultant de l'interpolation, la courbe  $C_p(\lambda)$  passe un maximum  $\lambda_{\max}$ , compris entre 5 et 16 environ, selon le nombre de pales de la turbine et c'est seulement pour cette valeur que  $C_p$  approche la valeur de 16/27.

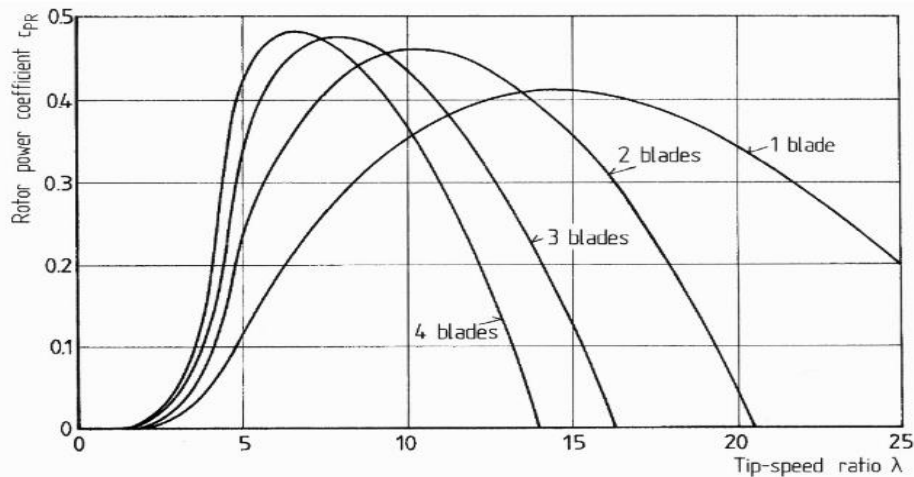


Figure III- 2 Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée  $\lambda$  [4]

#### III.4.5 Le rendement aérodynamique de l'éolienne

Qui est représentatif de la « qualité aérodynamique » de l'éolienne

$$\eta_a = \frac{C_p}{C_{p_{\max}}} = \frac{C_p}{0.593} \quad (25)$$

#### III.4.6 Le couple développé sur le rotor de l'éolienne

$$T = C_p \frac{\rho S V^3}{2 \omega} = C_p \frac{R \rho S V^3}{2 k} \quad (26)$$

Avec :



$K = \omega \frac{R}{v}$  (  $\omega$  est la vitesse angulaire du rotor de l'éolienne )

### III.5 Fonction de probabilité de densité de Weibull

On rappelle que la fonction de répartition  $F(v)$  est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur  $v$  et que la densité de probabilité  $f(v)$  est la dérivée de  $F(v)$  :

$$F(v) = \frac{dF(v)}{dv} \quad (27)$$

Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent, La fonction de répartition Weibull à deux paramètres  $c$  et  $k$  s'écrit :

$$F(v) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (28)$$

En utilisant la relation (27), il résulte la fonction de la densité de probabilité  $f(v)$  :

$$f(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp - \left( \frac{v}{c} \right)^k \quad (29)$$

$k$  : paramètre de forme caractérise la répartition du vent

$c$  : paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent (plus  $c$  est élevé plus l'énergie se trouve dans les hautes vitesses

$v$  : vitesse du vent « instantanée » (moyennée sur 10 mn).

### III.6 La distribution de Rayleigh

La plupart des sites éoliens ayant une vitesse de vent qui respecte la distribution de Weibull avec un paramètre de forme  $k=2$ , on définit la distribution de Rayleigh qui est plus simple à manipuler [4] , on remplaçant  $k=2$  dans l'équation (29) on obtient :

$$f(v) = 2 \left( \frac{v}{c^2} \right) \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right] \quad (30)$$

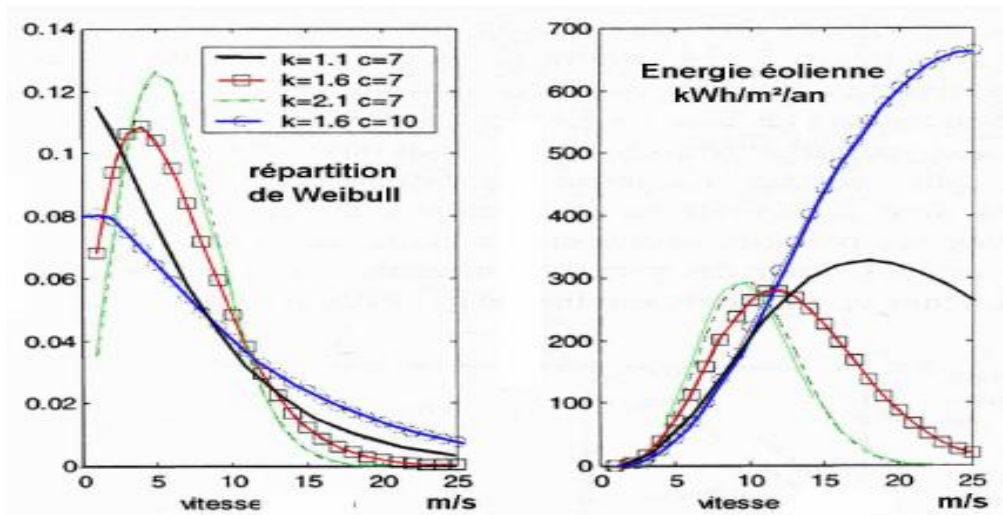


Figure III- 3 Distribution de la vitesse du vent et de l'énergie correspondante pour différents couples de paramètres de la distribution [4]

La vitesse moyenne annuelle divisée par le nombre d'heures total annuel (8760h/an) peut être définie de la façon suivante :

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{8760} \int_0^{\infty} f(V) dV \quad (31)$$

### III.7 Loi de Davenport et Harris

La vitesse du vent est également fonction de l'altitude la loi (empirique) de Davenport et Harris exprime cette dépendance :

$$\frac{V}{V_0} = \left[ \frac{z}{z_0} \right]^\alpha \quad (32)$$

avec  $\alpha$  compris entre 0,1 et 0,4 (0,1 correspond à la mer, 0,16 à une plaine, 0,28 à une forêt et 0,4 à une zone urbaine), la modélisation est valable s'il n'y a pas de changement de rugosité en amont ( $\alpha$  constant) [4]. Alors la puissance dépend de l'altitude  $Z$  :

$$\frac{P}{P_0} = \left[ \frac{z}{z_0} \right]^{3\alpha} \quad (33)$$

## III.8 Modélisation d'un système de stockage ( Batteries )

### III.8.1 Caractéristiques de la batterie

#### III.8.1.1 L'état de charge

Une donnée très importante est l'état de charge EDC (**SOC** pour State Of Charge ), cette valeur est exprimée en pourcent. Il s'agit tout simplement de la capacité actuelle (Q) de la batterie exprimée en fonction de sa **capacité nominale** ( $Q_{max}$ ), c'est-à-dire lorsqu'elle est chargée à 100% de EDC[7].

$$EDC = \frac{Q(Ah)}{Q_{max}} \quad (34)$$

A l'inverse, nous pouvons parler de la profondeur de décharge PDD (**DOD** , pour Depth Of Discharge ). Il s'agit également d'un pourcentage représentant l'inverse du EDC. Ainsi, une batterie ayant un EDC de 100% présentera un PDD de 0% alors qu'un EDC de 0% correspondra à un PDD de 100%. Lorsque le PDD dépasse les 80%, nous pouvons parler de décharge profonde de la batterie [7].

$$PDD = 1-EDC \quad (35)$$

#### III.8.1.2 La tension à vide

Une autre tension importante est la tension à circuit ouvert, ou voltage à circuit ouvert, que nous appellerons ici « **OCV** » (pour « Open Circuit Voltage »). Il s'agit donc du voltage de la batterie lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge, c'est-à-dire lorsque le circuit électrique n'est pas fermé, est ouvert. L'OCV augmente également avec le SOC. Ce voltage à circuit ouvert est généralement 5 à 7% plus élevé que le voltage lorsque la batterie est connectée à une charge[7].

#### III.8.1.3 Cycles de charge

Il s'agit du nombre de cycles de charge-décharge complets que la batterie peut endurer avant de ne plus pouvoir satisfaire les exigences de performance. Ce nombre de cycles peut varier en fonction de l'utilisation de la batterie. Précisons qu'un cycle est généralement défini comme la décharge complète d'une batterie initialement chargée à 100%, suivie d'un rechargement complet. Ce n'est cependant pas toujours le cas. En effet, les fabricants se

limitent souvent à 80% de PDD afin d'évaluer la batterie, 80% de l'énergie stockée est donc délivrée et 20% ne sont pas utilisés. Cela permet d'augmenter la durée de vie de la batterie[7].

### III.9 Modèle électrique de CIEMAT

Le premier modèle utilisé pour la simulation a été développé par le CIEMAT en Espagne (Centro de Investigaciones Energéticas, Mediambientales y Tecnológicas) qui définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction de quelques paramètres, tels que le courant imposé, son état de charge et sa température. Ce modèle tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge [8].

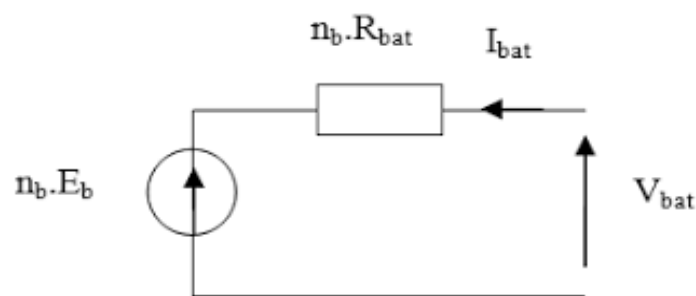


Figure III- 4 Schéma équivalent électrique de la batterie dans le modèle CIEMAT

Dans ce modèle, pour  $n_b$  cellules en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée par la relation suivante, où  $U_{bat}$  et  $I_{bat}$  sont la tension et le courant de la batterie,  $E_b$  est la f.é.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie et  $R_{bat}$  sa résistance interne[8].

$$U_{bat} = n_b E_b \pm n_b R_{bat} I_{bat} \quad (36)$$

La description du comportement de la batterie selon le modèle CIEMAT, nécessite trois équations correspondantes aux trois régimes de fonctionnements : le régime de décharge, le régime de charge et le régime de surcharge de la batterie. L'ensemble de ces équations tient compte de l'expression normalisée de la capacité  $C_{bat}$  de la batterie. L'état de charge EDC de la batterie est fonction de la charge résiduelle et du régime de charge ou de décharge[8].

#### III.9.1 Modélisation de la capacité $C_{bat}$

Le modèle de la capacité  $C_{bat}$  donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge  $I_{bat,moy,déch}$ . Cette capacité est donnée par

$$C_{\text{bat}} = \frac{1,67 C_{10}}{1 + 0,67 \left( \frac{I_{\text{bat}}}{I_{10}} \right)^{0,9}} (1 + 0,005 \Delta T) \quad (37)$$

$I_{10}$  : Courant nominal de la batterie (en A) donné par le constructeur

$C_{10}$  : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge à courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C_{10} = 10 I_{10} \quad (38)$$

$\Delta T$  : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie. L'état de charge de la batterie EDC est fonction de la capacité  $C_{\text{bat}}$  et de la quantité de charge manquante à la batterie  $Q_m$  [8]. L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par :

$$Q_m = I_{\text{bat}} t \quad (39)$$

Où  $t$  est la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant  $I_{\text{bat}}$ . L'expression de l'état de charge de la batterie EDC est donnée par :

$$\text{EDC} = 1 - \frac{Q_m}{C_{\text{bat}}} \quad (40)$$

### III.9.2 Tension de batterie en régime de décharge

$$U_{\text{bat-déch}} = n_b E_{b\text{-déch}} - n_b R_{b\text{-déch}} |I_{\text{bat}}| \quad (41)$$

$$E_{b\text{-déch}} = 1,965 + 0,12 \text{ EDC} \quad (42)$$

$$R_{b\text{-déch}} = R_{\text{bat}} = \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{4}{1 + |I_{\text{bat}}|^{0,3}} + \frac{0,27}{\text{EDC}^{1,5}} + 0,02 \right) (1 - 0,007 \Delta T) \quad (43)$$

### III.9.3 Tension de batterie en régime de charge

En régime de charge et avant l'apparition du phénomène de "Gassing" (dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène), la f.é.m. et la résistance interne sont déterminées par

$$E_{b\text{-ch}} = 2 + 0,16 \text{ EDC} \quad (44)$$

$$R_{b\text{-ch}} = R_{\text{char}} = \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{6}{1 + |I_{\text{bat}}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-\text{EDC})^{1.2}} + 0,036 \right) (1-0.025\Delta T) \quad (45)$$

D'où l'expression de la tension de la batterie avant la charge

$$U_{\text{bat-ch}} = n_b E_{b\text{-ch}} + n_b R_{b\text{-ch}} I_{\text{bat}} \quad (46)$$

### III.9.4 Tension de batterie en régime de surcharge

En régime de surcharge, l'expression de la tension de la batterie tient compte de deux phénomènes physiques qui sont, le "Gassing" dont la tension est  $V_g$  et la saturation qui exprime le repos de la batterie, lorsque son état de charge ne varie plus entraînant la tension de batterie appelée tension de fin de charge  $V_{ec}$  [8]. Pour ce régime de surcharge, l'expression de la tension de batterie est alors donnée par

$$U_{\text{bat-surch}} = n_b V_g + n_b (V_{ec} - V_g) \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t - t_g}{\tau_g} \right) \right] \quad (47)$$

$t_g$  : l'instant au bout duquel  $U_{\text{bat-charge}} = V_g$

$V_g$  : Tension de "Gassing"

$V_{ec}$  : Tension de fin de charge

$\tau_g$  : Constante de temps

$$V_g = \left[ 2,24 + 1,97 \ln \left( 1 + \frac{I_{\text{bat}}}{C_{10}} \right) \right] (1-0,002\Delta T) \quad (48)$$

$$V_{ec} = \left[ 2,45 + 2,011 \ln \left( 1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}} \right) \right] (1 - 0,002\Delta T) \quad (49)$$

$$\tau_g = \frac{1,73}{1 + 852 \left( \frac{I_{bat}}{C_{10}} \right)^{1,67}} \quad (50)$$

### III.9.5 Modélisation du rendement faradique

Les rendements Faradiques, ou Coulombiens, sont des rendements qui concernent la capacité de la batterie à emmagasiner de l'énergie. Ils ne font pas intervenir les pertes par effet Joule dans la résistance interne. Pour le modèle CIEMAT, le rendement Faradique est pris en compte dans le cas de la charge et il est supposé égal à 1 ( $\eta_{décharge} = 1$ ) en régime de décharge [8]. Le rendement Faradique en charge dépend du taux de charge, il a une valeur voisine de 100 % pour de faibles courants de charge et un faible état de charge. Puis, il se dégrade lorsque nous approchons de la pleine charge [8].  $\eta_{charge}$  est donné par la relation suivante :

$$\eta_{charge} = 1 - \exp \left[ \frac{20,73}{\frac{I_{bat}}{I_{10}} + 0,55} (EDC-1) \right] \quad (51)$$

### III.9.6 Modélisation du système hybride (photovoltaïque-éolien)

L'énergie délivrée par un module photovoltaïque est décrite par la caractéristique (I-V) qui varie de manière à ce que le courant suivie une relation de la forme:  $I = f(V, E_s, T_j)$ . On voudrait toujours déterminer la puissance maximale que peut fournir un groupe de modules photovoltaïques pour un ensoleillement et une température donnée [4]. La puissance produite par un aérogénérateur éolien est estimée par la relation suivante:

$$P = \int_{V_i}^V P(V)f(V) dV \quad (52)$$

Ainsi, connaissant les caractéristiques de l'aérogénérateur choisi, de la moyenne mensuelle par jour de la vitesse du vent et de la densité de probabilité de Weibull correspondante, nous pouvons déduire rapidement la puissance produite par le système hybride[4].

$$E_{pv}S_{pv} + E_eS_e = E_d \quad (53)$$

### III.9.7 Capacité du système de stockage

La taille de la batterie de stockage est déterminée à partir de la charge demandée maximale  $E_{dmax}$  (charge mensuelle maximale) [9]. La capacité de la batterie de stockage (en Ah) pour une période de temps  $\Delta t$  par jour est donnée par l'équation suivante :

$$C_{bat} = \frac{E_{dmax} \cdot 1000}{V_{sys}} \frac{\Delta t}{N_m} \quad (54)$$

$V_{sys}$  : Tension nominale du système

$N_m$  : Nombre de jours du moins le plus défavorable

$\Delta t$  : Durée relative en jours à l'autonomie demandée, qui est définie par le concepteur. La capacité réelle de la batterie est déterminée à partir de la capacité d'une unité de batterie  $C_{bat,u}$  comme pour le cas des surfaces des générateurs photovoltaïque et éolien.

Elle est donnée par l'équation suivante :

$$C_{bat,u} = C^{te} C_{bat,u} \quad (55)$$

$C^{te}$  qui est une constante donnée par la partie entière du rapport  $\left( \frac{C_{bat}}{C_{bat,u}} \right)$

## Conclusion

Ce chapitre traite en termes généraux des lois de modélisation du système hybride pour l'énergie solaire (modèle électrique de la cellule solaire photovoltaïque) et éolienne (modèle du générateur éolien), et du modèle de système de stockage (batteries).

Dans le chapitre suivant nous allons adapter une simulation du système hybride photovoltaïque-éolienne-Batteries à l'aide du logiciel **HOMER pro**.



## Bibliographie

- [1] P. Stockage *et al.*, “Modélisation De s Composants D ’ un Système Hybride Panneaux Photovoltaïque – Stockage D ’ énergie Via L ’ hydrogène – Batteries,” no. February, 2018, doi: 10.19044/esj.2018.v14n3p545.
- [2] “1. Schéma électrique équivalent d’une cellule photovoltaïque. | Download Scientific Diagram.” [https://www.researchgate.net/figure/Schema-electrique-equivalent-dune-cellule-photovoltaïque\\_fig9\\_324474604](https://www.researchgate.net/figure/Schema-electrique-equivalent-dune-cellule-photovoltaïque_fig9_324474604) (accessed May 23, 2021).
- [3] R. Algerienne, D. Et, ..... P. ...., N. Khalil, M. Belatel, and A. Zigha, “.Présenté par,” 2013 *الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية*
- [4] B. Multon *et al.*, “Etat de l ’ art des aérogénérateurs To cite this version : HAL Id : hal-00674088,” 2012.
- [5] “Étude théorique d’une éolienne - Wiki Éolienne.” [https://eolienne.f4jr.org/eolienne\\_etude\\_theorique](https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique) (accessed May 13, 2021).
- [6] M. BELATEL, F. BENCHIKH, Z. SIMOHAMED, F. FERHAT, and F. Z. AISSOUS, “Technologie du couplage d’un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l’électricité verte,” *Rev. des Energies Renouvelables*, vol. 14, pp. 145–162, 2011.
- [7] A. Baiwir and P. Andre, “Modélisation de systèmes de stockage électrique et leur intégration dans un réseau électrique intelligent Master en Sciences et Gestion de l ’ Environnement – finalité Energies Renouvelables ( ULg ) Master en Développement Durable – finalité Énergie-Envir,” 2017.
- [8] S. Hakim, M. Elyaqouti, L. Bouhouch, and A. Moudden, “Comparaison de deux modèles de batterie utilisés dans les systèmes photovoltaïques [ Comparison between two models of the battery storage used in the photovoltaic system ],” vol. 20, no. 4, pp. 1033–1041, 2017.
- [9] F. Boumediene, “Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d’électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah,” *Mémoire de Magister*, p. 152, 2012.



## Chapitre IV

# Simulation du système hybride photovoltaïque- éolienne

## Introduction

Un système d'alimentation hybride est composé de divers composants. Lors de la conception d'un système électrique hybride, des facteurs tels que la taille des composants, les configurations du système, l'adéquation des diverses ressources d'énergie renouvelable dans cette région, les aspects économiques du projet avec l'évolution des charges et des coûts des composants, le cycle de vie du système, le coût actuel net du système, le coût de l'énergie pour l'utilisateur final, les coûts de maintenance et les coûts de fonctionnement annuels du système hybride aideront le décideur à déterminer les solutions les plus rentables du système hybride pour répondre aux charges électriques pour lesquelles il est en cours de conception[1]. ce chapitre présente une étude de cas conçue où l'Algérie est choisie.

## IV. Présentation du Logiciel Homer Pro

Le logiciel d'optimisation hybride de plusieurs ressources énergétiques **HOMER Pro** (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) développé par le Laboratoire National des Energies Renouvelables (National Renewable Energy Laboratory) modélise des systèmes de micro-alimentation avec une ou plusieurs sources d'alimentation (par exemple, photovoltaïque et éoliennes), et aide à concevoir des systèmes hors réseau et connectés au réseau au moindre coût des moyens efficaces, Il simule diverses configurations pour trouver les combinaisons les moins coûteuses qui répondent aux charges électriques considérées. Les capacités d'optimisation et d'analyse de sensibilité de **HOMER Pro** permettent de répondre à d'importantes questions de conception telles que «Quelles technologies sont les plus rentables? Quelle doit être la taille des composants? Qu'arrive-t-il à la rentabilité du projet si les coûts ou les charges changent? La ressource énergétique renouvelable est-elle adéquate? » [1]. Le principal avantage de **HOMER Pro** est la flexibilité qu'il offre aux utilisateurs. Les systèmes hors réseau et connectés au réseau peuvent être conçus et simulés dans **HOMER Pro**. Il a beaucoup de technologies d'énergie renouvelable dans ses bibliothèques qui peuvent être utilisées pour trouver le meilleur système qui soit économiquement acceptable. Pour utiliser **HOMER Pro**, le programme nécessite un modèle avec des entrées, qui décrivent les options technologiques, les coûts des composants et la disponibilité des ressources. **HOMER Pro** utilise ces entrées pour simuler différentes configurations système ou combinaisons de composants et génère des résultats qui peuvent être analysés sous la forme d'une liste de

configurations réalisables triées par coût actuel net. Il faut comprendre ses trois capacités de base : la simulation , optimisation et analyse de sensibilité et comment ils interagissent [2].

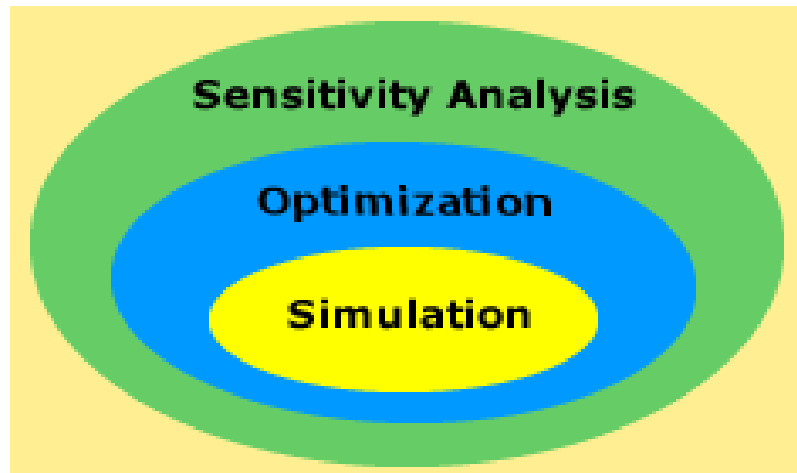


Figure IV- 1 Les trois capacités de base de Homer Pro [3]

#### IV.1 Géographie et climat Description du cas étudié

Le cas d'étude de cette thèse est une zone de la Wilaya de Tlemcen qui est située dans le nord-ouest de l'Algérie. La superficie de cette province couvre 40,11 km<sup>2</sup> . Elle est divisée en communes limitrophes (Hennaya, Chetouane, Mansourah, Terny Beni Hdiel, Aïn Fezza), et chaque commune contient un certain nombre de villes et villages. L'aéroport international de Tlemcen est situé au nord de la commune de Zenata, à 22 km au nord-ouest de la ville de Tlemcen (Daïra de Hennaya) , est sélectionné pour cette recherche. Tlemcen se trouve à 812 m d'altitude , le climat y est chaud et tempéré. L'hiver se caractérise par des précipitations bien plus importantes qu'en été, le climat y est classé Csa (climat méditerranéen). La température moyenne annuelle à Tlemcen est de 15.4 °C. Sur l'année, la précipitation moyenne est de 454 mm [4]. la température peut atteindre son maximum de 32,2°C. Les précipitations sont très légères et intermittentes, et les étés sont secs. De nombreux sites de Tlemcen, isolés et éloignés les uns des autres, ne sont pas raccordés au réseau. Ainsi, cela conduit à penser à des systèmes hybrides pour produire de l'électricité pour les habitants de cette région.



Figure IV- 2 Carte de la Wilaya de Tlemcen [5] et de la zone de zenata [6], Algérie

Tableau IV- 1 : Les cordonnés géographiques du site

Site	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Climat
Tlemcen	40,11	<u>34° 53'</u> Nord	<u>1° 19'</u> Ouest	812	Csa (climat méditerranéen)
Zone Zenata	<b>166 Ha</b>	<u>35° 1'</u> Nord	<u>1° 27'</u> Ouest	248	BSk (semi-aride sec froid)

Dans ce travail, la simulation est faite par le logiciel **HOMER Pro**. Lorsque **HOMER Pro** est lancé, il démarre avec l'écran d'accueil **HOMER pro**, nous pouvons choisir l'emplacement du projet en cliquant sur la carte géographique ou en entrant le nom de l'emplacement dans le champ de recherche. Nous pouvons également saisir le nom, l'auteur et la description du projet (si le projet existe déjà). L'écran d'accueil contient également quatre entrées clés : le taux d'actualisation, le taux d'inflation, la pénurie de capacité annuelle maximale et la durée de vie du projet. Le ruban est organisé en six onglets : charge, composants, ressources, projet, système et aide. Cependant, l'interface **HOMER Pro** est organisée en : conception, résultats et bibliothèque.



Figure IV- 3 Écran d'accueil HOMER Pro x64 3.14.2

### IV.1.1 Profil de charge

Dans cette recherche, le système d'alimentation hybride est destiné à fournir de l'électricité pour les zones hors réseau, nous devons obtenir le profil de charge d'un seul ménage afin de dériver le profil de charge du ménage, qui n'a pas eu d'électricité auparavant. D'autres facteurs peuvent jouer des rôles importants dans la charge tels que le mode de vie des personnes, le revenu familial et la capacité d'achat d'appareils électriques. Par conséquent, pour dériver le profil de charge d'un seul ménage, nous nous sommes référés à la revue de la littérature des profils de charge disponibles sur Internet de plusieurs projets d'électrification de zones reculées réalisés en algérie et dans des pays en développement.

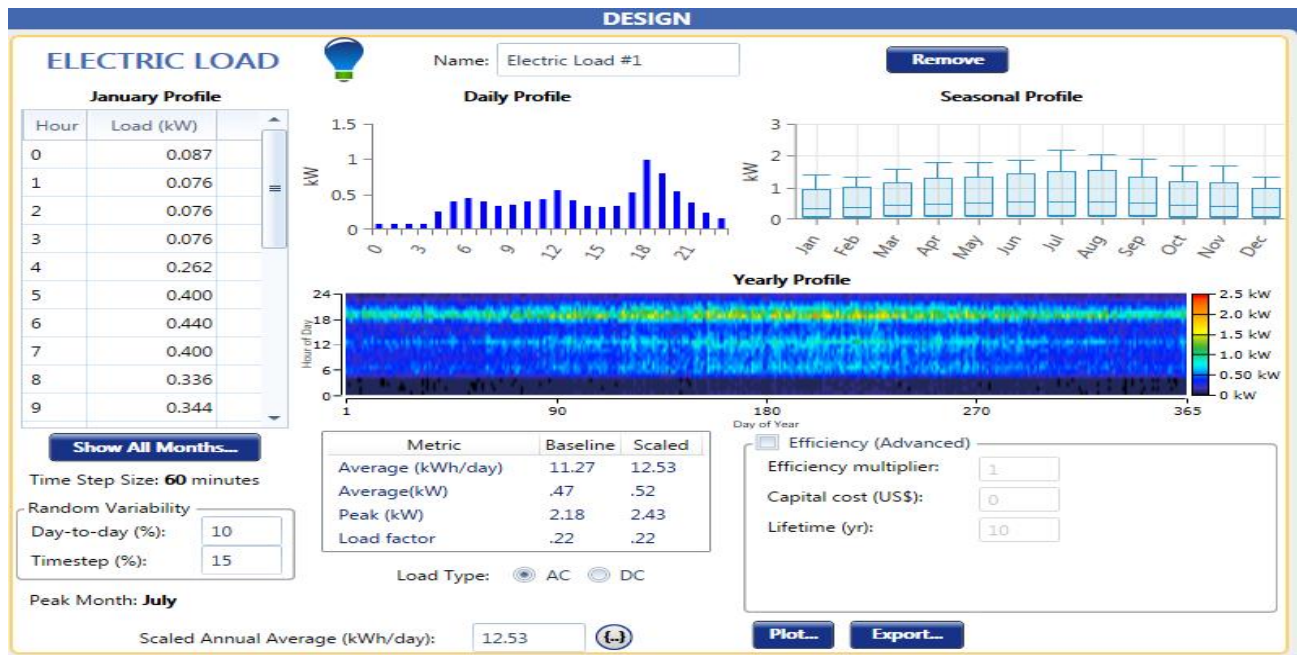


Figure IV- 4 Charge primaire importée dans HOMER Pro (avec spécifications de variabilité aléatoire)

L'un des tracés que **HOMER Pro** peut créer à partir des données saisies est le profil annuel connu sous le nom de carte D. Une D-map est une visualisation de la charge électrique de l'année entière à partir du lundi 1er janvier à minuit. L'heure des jours est représentée sur l'axe des y et le jour des années est situé sur l'axe des x. En pointant la souris sur un point particulier de la D-map, nous pouvons voir le charge à ce pas de temps.

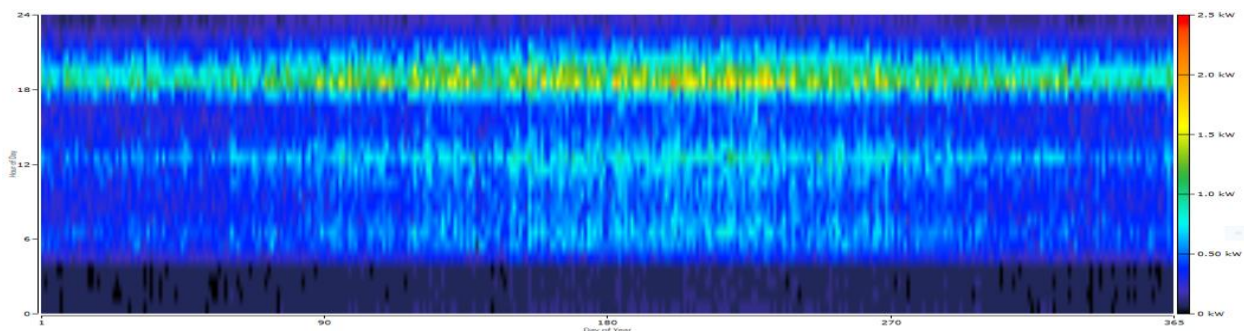


Figure IV- 5 Profil de charge annuel

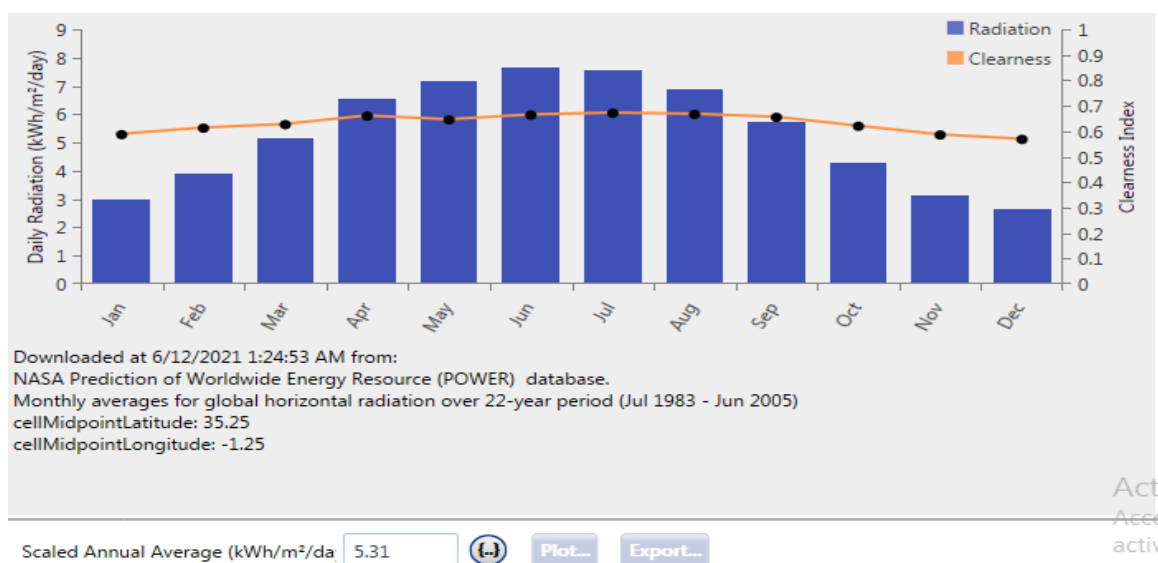
## IV.2 Évaluation des ressources et collecte de données

### IV.2.1 Données sur les ressources solaires

La connaissance de l'éclairement énergétique à la surface d'un capteur est essentielle pour l'évaluation des ressources solaires. La plupart des stations météorologiques enregistrent



l'irradiation totale sur une surface horizontale également connue sous le nom d'irradiation globale horizontale (GHI). GHI, quant à lui, représente la somme du rayonnement solaire incident directement à la surface de la terre et de l'irradiance horizontale diffuse (DHI). C'est un paramètre important pour la conception des systèmes photovoltaïques à panneaux. L'irradiance horizontale diffuse est le rayonnement du soleil qui ne frappe pas directement la surface de la terre, mais a plutôt été dispersé par des molécules, des nuages, de la poussière ou d'autres particules dans l'atmosphère terrestre et vient également de toutes les directions. La zone d'étude de cas étant située à Zenata, le district de ressources solaires obtenu à partir de la base de données de prévision des ressources énergétiques mondiales (POWER) de la NASA.



**Figure IV- 6 Rayonnement quotidien de Tlemcen région de Zenata**

La moyenne annuelle mise à l'échelle s'est avérée être de 5,31 kWh/m<sup>2</sup>/jour. L'irradiation quotidienne la plus élevée au cours de l'année est juin et juillet, qui sont également essentiellement parmi les jours les plus chauds, comme le montre la figure (IV-6) . L'indice de clarté le plus élevé connu pendant la saison sèche est de 0,670 en juillet. Cependant, l'indice de clarté le plus bas est de 0,567 en décembre.

#### IV.2.2 Données sur les ressources éoliennes

Tout comme le solaire, pour quantifier le potentiel éolien dans une zone, des vitesses de vent à certaines hauteurs de moyeu sont nécessaires. La mesure des données de vent dans les stations météorologiques est généralement effectuée à une hauteur de moyeu de 10 m et est principalement utilisée à des fins de prévision météorologique. Pour notre site la vitesse du

vent moyenne annuelle de 5,39 m/s hauteur de 10 m selon l'enregistrement de la base de données de prévision des ressources énergétiques mondiales (POWER) de la NASA, comme le montre la figure(IV-7). L'énergie électrique peut être générée à partir de l'énergie éolienne lorsque le vent souffle à travers une éolienne. L'énergie cinétique du vent à la vitesse nominale du vent est convertie en puissance mécanique en faisant tourner la pale de turbine, produisant ainsi de l'électricité à travers l'arbre relié à l'alternateur.

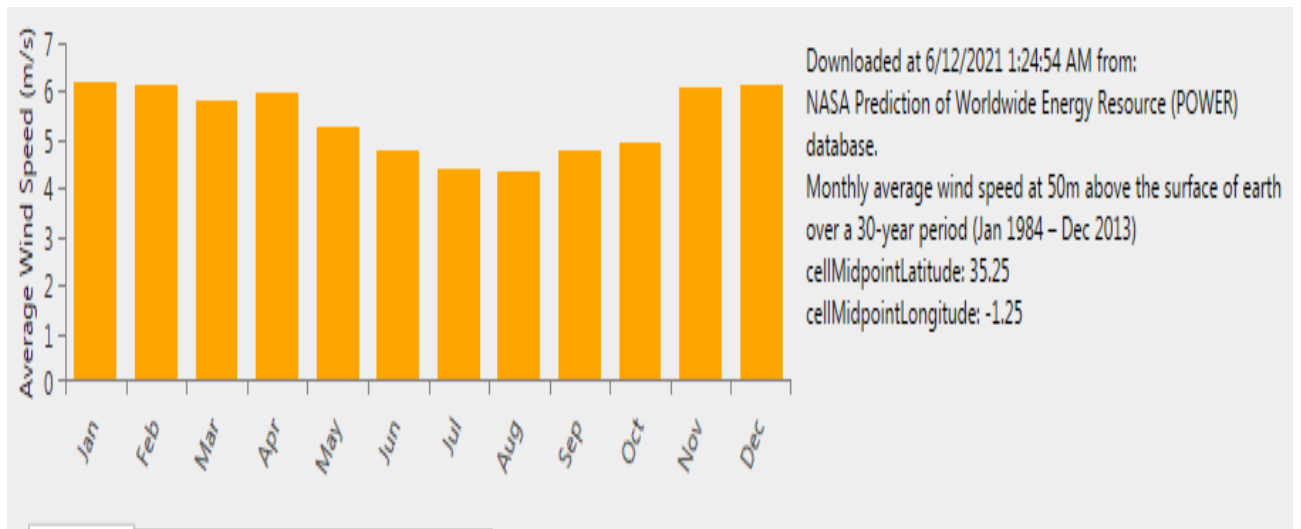


Figure IV- 7 Vitesse moyenne mensuelle du vent reçue

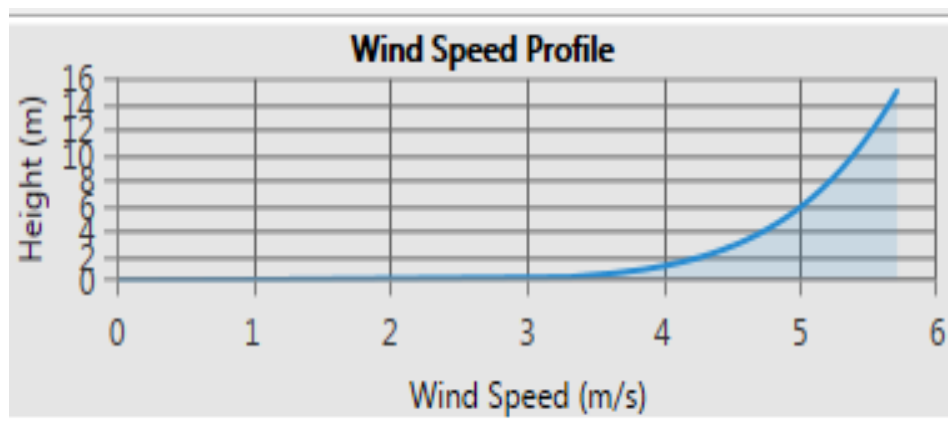


Figure IV- 8 Profil de vitesse du vent

### IV.2.3 Température ambiante

La température ambiante sur le site sélectionné est également d'une grande importance, car les performances solaires photovoltaïques ont une corrélation négative avec la température ambiante, comme le montre la revue de la littérature. La température quotidienne moyenne

annuelle dans ce cas est de 18 °C . La température quotidienne la plus élevée enregistrée au cours de la saison est de 25,94 pour juillet et de 26,62 °C pour août. Cependant, la température quotidienne la plus basse est de 11,1°C en janvier.

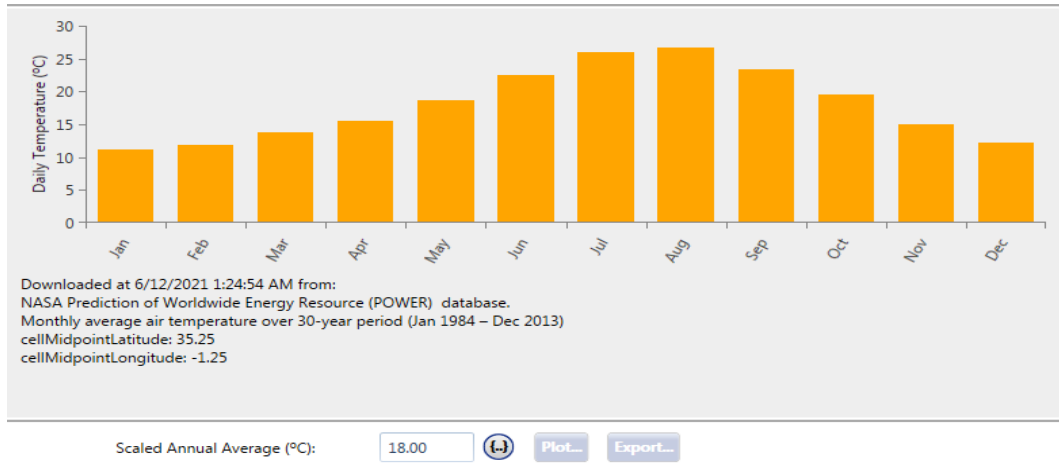


Figure IV- 9 Température de l'air ambiant moyenne mensuelle reçue

Tableau IV- 2: Rayonnement solaire et vitesse du vent incluant la température moyenne

Mois	Indice de clarté	Vitesse du vent [m/s]	Rayonnement solaire [KWh/m²/jour]	Température moyenne[°C]
Janvier	0.586	6.180	2.980	11.100
Février	0.612	6.110	3.920	11.820
Mars	0.625	5.790	5.140	13.700
Avril	0.659	5.960	6.560	15.550
May	0.644	5.260	7.150	18.600
Juin	0.663	4.780	7.650	22.520
Juillet	0.670	4.370	7.570	25.940
Août	0.666	4.340	6.890	26.620
Septembre	0.654	4.750	5.750	23.300
Octobre	0.619	4.950	4.290	19.580
Novembre	0.585	6.080	3.140	15.040
Décembre	0.567	6.150	2.650	12.250

### IV.3 Modélisation des composants du système hybride

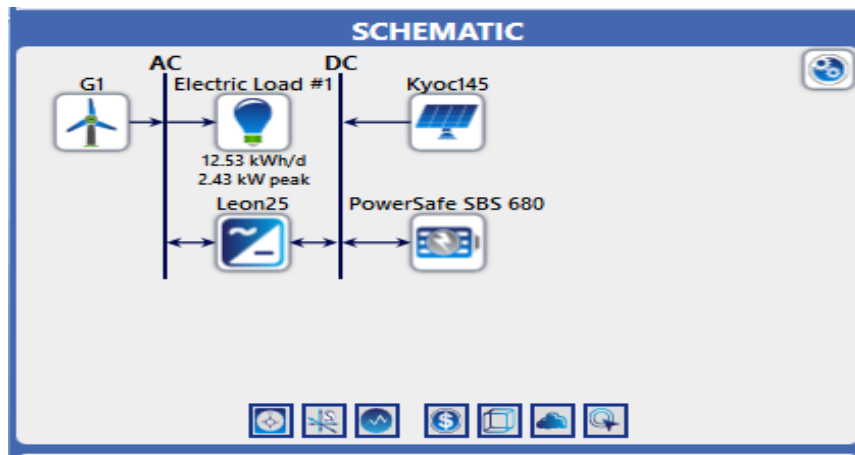


Figure IV- 10 Schéma du système hybride simulé (Source : HOMER Pro)

#### IV.3.1 Modélisation de panneaux solaires photovoltaïques

Les panneaux solaires sont un groupe de cellules connectées en parallèle et en série pour générer la puissance électrique requise en fonction de facteurs météorologiques tels que le rayonnement solaire et la température. Un panneau en silicium multi-cristallin modèle kyocera145 SX-UFU , Série à 36 cellules destiné aux systèmes hors réseau , a été utilisé dans l'étude en raison de son efficacité relative élevée 14,4, de sa robustesse, de ses performances exceptionnelles à faible éclaircissement : 88 % et de son prix relativement bas . Le composant a été choisi pour être le principal générateur d'électricité en raison de l'ensoleillement abondant. Avec le bon angle d'inclinaison, les modules bénéficient d'un ensoleillement tout au long de la journée.

**DESIGN**

Add/Remove Kyocera KD 145 SX-UFU

**PV** Name: Kyocera KD 145 SX-UFU Abbreviation: Kyoc145

**Properties**

- Name: **Kyocera KD 145 SX-UFU**
- Abbreviation: **Kyoc145**
- Panel Type: **Flat plate**
- Rated Capacity (kW): **0.145**
- Temperature Coefficient: **-0.460**
- Operating Temperature (°C): **45.00**
- Efficiency (%): **14.4**
- Manufacturer: **Kyocera**
- [Data Sheet KD 145 SX-UFU](#)
- Notes: **Meant for Off- grid systems.**

**Cost**

Capacity (kW)	Capital (US\$)	Replacement (US\$)	O&M (US\$/year)
10	14,000.00	13,000.00	150.00

Lifetime time (years): 25.00

**Sizing**

- HOMER Optimizer™
- Search Space
- Advanced

**Site Specific Input**

Derating Factor (%): 88.00

**Electrical Bus**

AC  DC

Figure IV- 11 Spécifications des modules solaires photovoltaïques

Tableau IV- 3 : Paramètres de conception des modules solaires photovoltaïques

Paramètres	Unité	Valeur
Coût de remplacement	\$	13,000.00
Coût d'exploitation et d'entretien	\$/ans	150.00
Température de fonctionnement	°C	45
Coefficient de température	°C	-0.460
Capacité nominale	KW	0.145
Facteur de déclassement	%	88
Efficacité	%	14.4

### IV.3.2 Convertisseur

Le modèle conçu dans **HOMER Pro** se compose à la fois de générateurs CC et CA connectés à une charge CA uniquement. Un convertisseur est donc nécessaire pour maintenir le flux d'énergie entre les composants AC et CC. Un convertisseur bidirectionnel triphasé Leonics MTP-413F 25 kW a été choisi pour le système. Les spécifications sont indiquées dans le tableau, le logiciel **HOMER Pro** est utilisé pour l'optimisation de la taille. La taille peut alors être réduite ou augmentée en fonction du résultat de la simulation.

The screenshot displays the configuration window for a 'CONVERTER' in HOMER Pro. The selected model is 'Leonics MTP-413F 25kW'. The interface is divided into several sections:

- Properties:** Name: Leonics MTP-413F 25kW, Abbreviation: Leon25. Includes a 'Data Sheet for MTP-413F 25kW' link and a note: 'Grid-forming & grid-following. "Hybrid-inverter," designed for hybrid power systems combining solar with diesel and other renewable energy sources.'
- Costs Table:**

Capacity (kW)	Capital (US\$)	Replacement (US\$)	O&M (\$/year)
1	US\$600.00	US\$600.00	US\$0.0
0.25	US\$150.00	US\$150.00	US\$0.0
8	US\$14,500.00	US\$14,500.00	US\$0.0
- Capacity Optimization:** Includes options for 'HOMER Optimizer™', 'Search Space', and 'Advanced'.
- Inverter Input:** Lifetime (years): 10.00, Efficiency (%): 96.00. A checkbox 'Parallel with AC generator?' is checked.
- Rectifier Input:** Relative Capacity (%): 80.00, Efficiency (%): 94.00.

Figure IV- 12 Spécifications HOMER Pro pour le convertisseur

### IV.3.3 Modélisation de l'éolienne

Le vent est caractérisé par sa vitesse et sa direction et influencé par des facteurs tels que la position géographique, les facteurs météorologiques et la hauteur au-dessus du niveau du sol.

L'éolienne en tournant intercepte le vent et capte ainsi une partie de son énergie cinétique et la transforme en énergie utilisable. Une éolienne générique à axe vertical de 1 kW a été utilisée dans cette étude car il s'agit d'une éolienne à faible vitesse de démarrage (puisque le site est une zone venteuse Petite brise), silencieuse, sûre et fiable. Il a également une grande fiabilité dans les applications hors réseau. La courbe de puissance de cette turbine est représentée sur la figure(IV-13). Pour permettre au logiciel de trouver une solution optimale, des dispositions pour utiliser 0 (pas de turbine), 1, 2, 4, 6 8 et 10 unités ont été utilisées dans l'espace de recherche. La courbe de puissance est un graphe représentant la puissance de sortie d'une éolienne à des vitesses de vent différentes et les paramètres de conception.

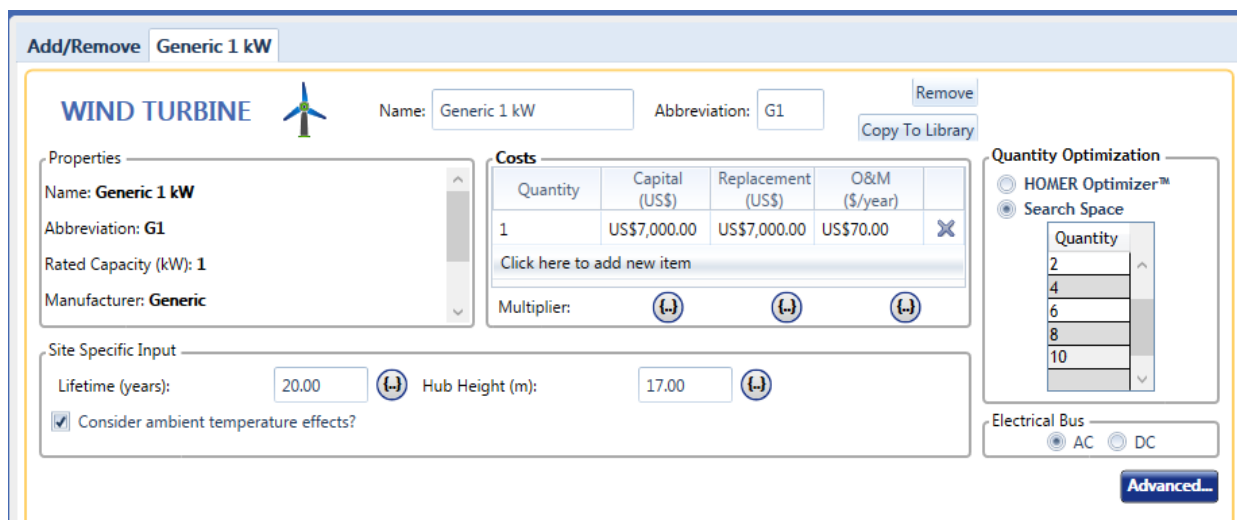


Figure IV- 13 Spécifications HOMER Pro pour éolienne

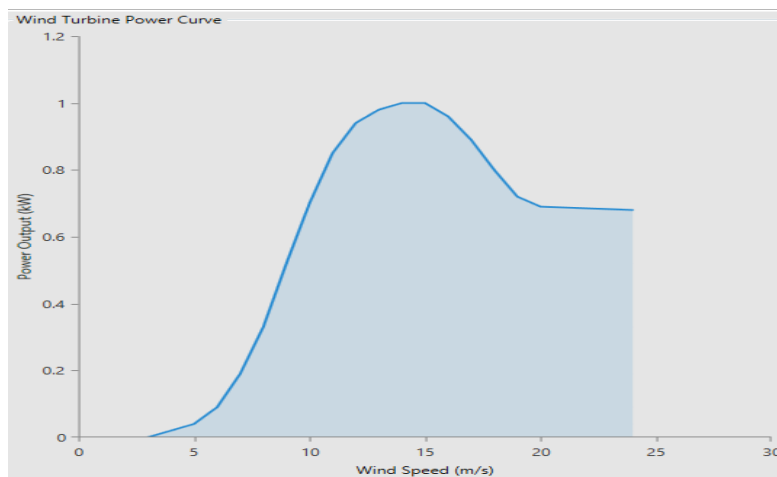


Figure IV- 14 Courbe de puissance d'éolienne

Tableau IV- 4 : Paramètres de conception de l'éolienne

Paramètres	Unité	Valeur
Coût en capital et de remplacement	\$	7,000.00
Coût d'exploitation et d'entretien	\$/ans	70.00
Diamètre du rotor	M	2.18
Puissance nominale	Watts	1000
Vitesse du vent de coupure	m/s	3
Vitesse nominale du vent	m/s	10

#### IV.3.4 Modélisation de la batterie

Lorsque la puissance générée par l'éolienne et le PV dans un système hybride est supérieure à la demande de charge, l'énergie excédentaire sera stockée dans les batteries et fournira de l'électricité pendant le temps. Le modèle de batterie SBS 680 d'EnerSys PowerSafe Compagnie a été choisi pour la modélisation du système et les détails sont répertoriés dans le tableau. Le nombre de batteries considéré dans l'étude d'optimisation a été déterminé par l'optimiseur **HOMER Pro** qui a décidé du nombre total nécessaire. En cas de défaillance de la production d'électricité, l'énergie stockée sera utilisée pour alimenter la charge, ce qui améliore la fiabilité du système.

Tableau IV- 5: Paramètres de conception des batteries

Paramètres	Unité	Valeur
Tension nominale	Volt	12
Capacité nominale	KWh	9.16
Efficacité aller-retour	%	97
Capacité maximale	Ah	763
Courant de charge max	A	680
Courant de décharge max	A	720

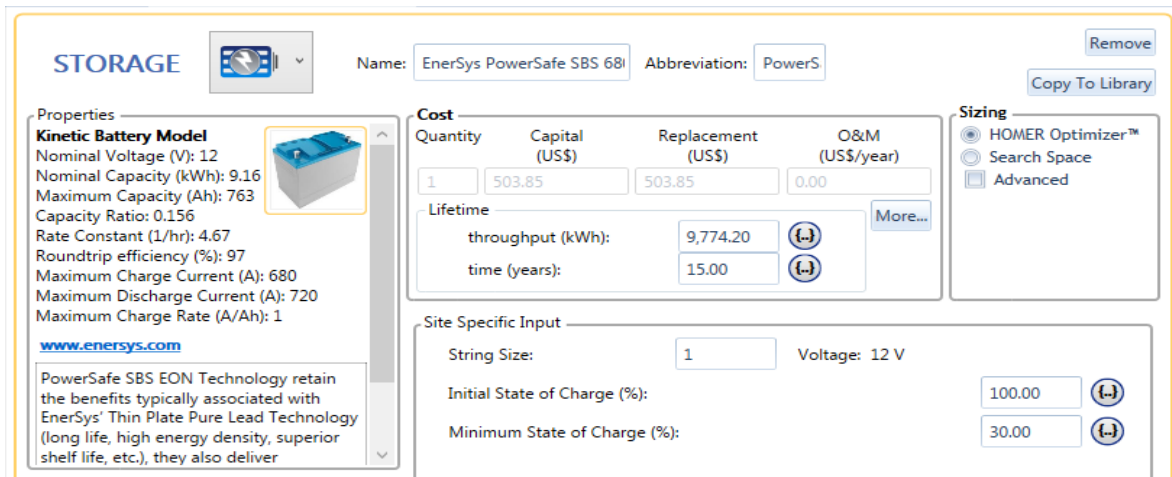


Figure IV- 15 Spécifications HOMER Pro pour le système de stockage (batterie)

#### IV.4 Résultats de la simulation et discussions

Dans cette étude, « une conception et une application de système hybride solaire-éolien de type domestique » est mise en œuvre. Les informations d'entrée qui doivent être fournies à **HOMER Pro** comprennent : les charges électriques (un an de données de charge), les ressources renouvelables (telles qu'un an de données de rayonnement solaire), les détails/coûts techniques des composants, les contraintes, les contrôles, le type de stratégie de répartition, etc. La figure(IV-16) ci-dessous indique à la fois la charge primaire CA (en bleu) et la charge primaire CA desservie (en marron) tout au long de l'année. La différence avec ces deux charges est représentée par la courbe en rouge. Cette courbe (rouge) est appelée charge électrique non satisfaite qui pourrait se produire parce que la puissance générée par le système n'était pas suffisante pour alimenter la charge.

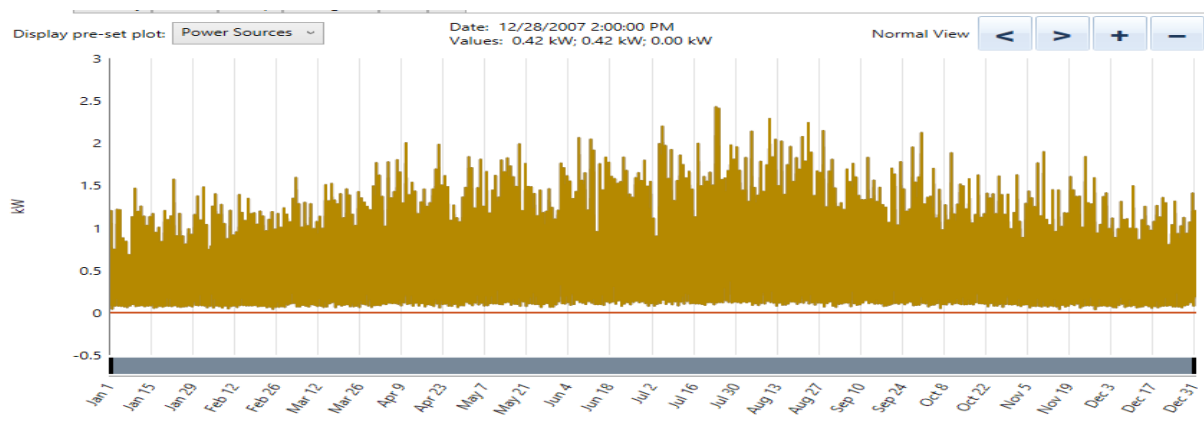
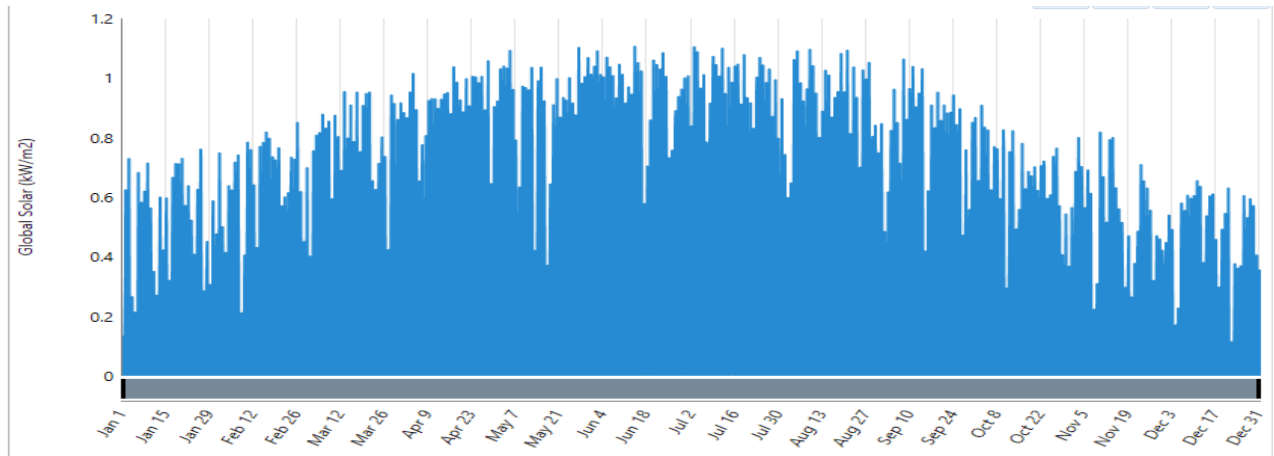


Figure IV- 16 La charge primaire AC (bleu), la charge primaire AC desservie (marron) et la charge électrique non satisfaite (rouge)



La figure (IV-17) illustre la puissance de rayonnement solaire globale reçue par le générateur PV inclinable. On voit clairement que le rayonnement solaire le plus élevé se produit en été (en juillet) il atteint 1,10 kW/m<sup>2</sup>.

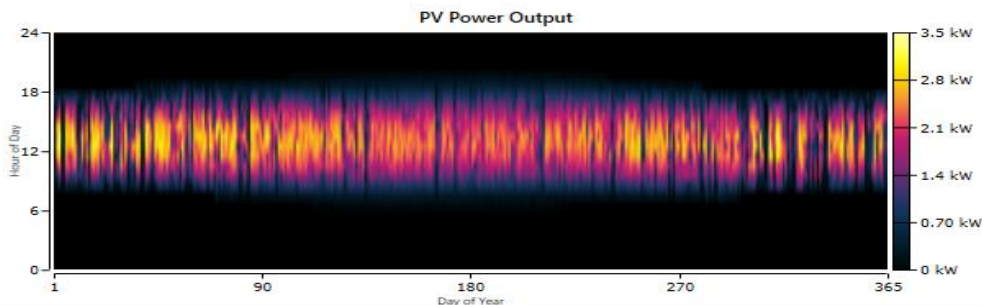


**Figure IV- 17 Puissance globale de rayonnement solaire**

On peut observer à partir du tableau que le PV fonctionnerait avec un facteur de capacité de 20 %. Avec une capacité installée de 3,33 kW, le générateur photovoltaïque pourrait atteindre une puissance maximale de 3,22 kW. Le LCOE de 0,0624 par kWh indiqué ci-dessus est basé sur le coût total des composants. Il s'agit du LCOE pour les coûts d'installation des panneaux photovoltaïques seuls. La figure(IV-18) montre la production d'énergie moyenne du solaire PV.

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	3.33	kW
Mean Output	0.666	kW
Mean Output	16.0	kWh/d
Capacity Factor	20.0	%
Total Production	5,834	kWh/yr
Dedicated converter	8.00	kW

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	3.22	kW
PV Penetration	128	%
Hours of Operation	4,384	hrs/yr
Levelized Cost	0.0624	US\$/kWh



**Figure IV- 18 Puissance de sortie photovoltaïque**

L'éolienne procède une facteur de capacité de 19.8% illustré dans la figure(IV-19) . Avec une capacité installée de 2 kW, le générateur photovoltaïque pourrait atteindre une puissance maximale de 2.03 kW. Le LCOE de 0,236 par kWh.

Quantity	Value	Units
Total Rated Capacity	2.00	kW
Mean Output	0.397	kW
Capacity Factor	19.8	%
Total Production	3,476	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	2.03	kW
Wind Penetration	76.0	%
Hours of Operation	7,153	hrs/yr
Levelized Cost	0.236	US\$/kWh

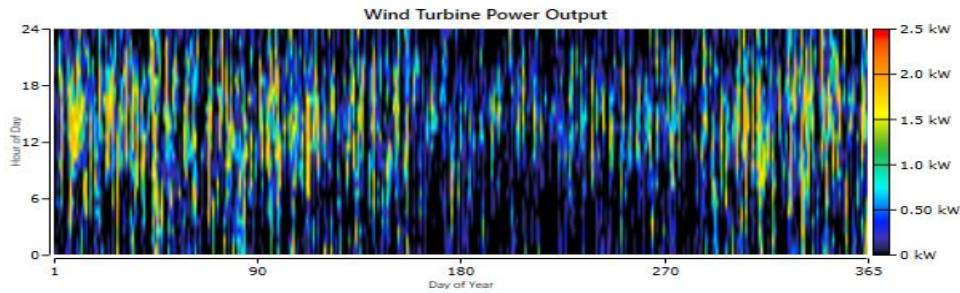


Figure IV- 19 Puissance de sortie de l'éolienne

#### IV.4.1 Performances du banc de batteries

L'architecture du système contient 8 batteries, avec une taille de chaîne de 1,00 par batterie, et 8 chaînes en parallèle et une tension de bus de 12 V. La taille de la batterie a une autonomie de 98,2 heures avec une capacité nominale de 73,2 kWh et un débit à vie de 25,109 kWh et durée de vie prévue de 15 ans. On peut voir sur la figure que l'état de charge du groupe de batteries varierait entre 75 et 100 %. Dans la figure(IV-20) , on peut montrer que l'efficacité du groupe de batteries est de 97 % figure(IV-15), c'est-à-dire qu'elle a 3 % de pertes. Cependant, le paramètre important est la durée de vie prévue de la batterie. Les résultats montrent que le parc de batteries aurait besoin d'être changé tous les 15 ans environ.

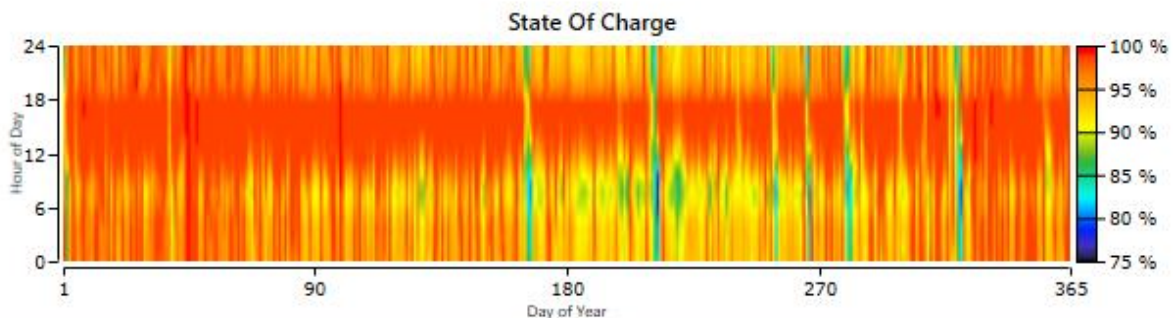


Figure IV- 20 État de charge du stockage de la batterie pendant un an

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Batteries	8.00	qty.	Autonomy	98.2	hr	Average Energy Cost	0	US\$/kWh
String Size	1.00	batteries	Storage Wear Cost	0.0523	US\$/kWh	Energy In	1,698	kWh/yr
Strings in Parallel	8.00	strings	Nominal Capacity	73.2	kWh	Energy Out	1,649	kWh/yr
Bus Voltage	12.0	V	Usable Nominal Capacity	51.3	kWh	Storage Depletion	1.20	kWh/yr
			Lifetime Throughput	25,109	kWh	Losses	51.0	kWh/yr
			Expected Life	15.0	yr	Annual Throughput	1,674	kWh/yr

Figure IV- 21 Indicateurs de performance simulés pour le banc de batteries

### IV.4.2 Résultats de l'optimisation du système hybride PV-éolien

Le profil de charge et les données météorologiques du fonctionnement du système hybride PV-éolien sont utilisés dans cette étude. Les mesures horaires du rayonnement solaire et de la vitesse du vent sur une période d'un an ont été importées dans les outils **HOMER Pro** pour calculer les valeurs moyennes mensuelles de l'indice de clarté et du rayonnement quotidien. Le rayonnement global moyen annuel est de 5,31 kWh/m<sup>2</sup>/jour avec un indice de clarté moyen annuel de 0,66 et le vent moyen annuel est de 5,39 m/s. Les résultats sont affichés sous une forme globale dans laquelle les configurations de système les mieux classées sont répertoriées en fonction de leur coût actuel net (CNP) pour le type de système possible. La figure(IV-22) montre une liste des combinaisons possibles de composants du système dans la forme globale.

Optimization Results									
Architecture								Cost	
Kyoc145 (kW)	Kyoc145-MPPT (kW)	G1	PowerSafe SBS 680	Leon25 (kW)	Dispatch	NPC (US\$)	COE (US\$)	Operating cost (US\$/yr)	Initial capital (US\$)
15.0	16.0	1	1	8.00	LF	US\$72,955	US\$0.624	US\$1,332	US\$38,593
3.33	16.0	2	4	8.00	LF	US\$73,950	US\$0.627	US\$1,402	US\$37,771
13.3	16.0	8	8	8.00	LF	US\$74,060	US\$0.628	US\$1,329	US\$39,786
13.3	16.0	8	8	8.00	LF	US\$74,060	US\$0.628	US\$1,329	US\$39,786
3.33	8.00	2	8	8.00	LF	US\$74,192	US\$0.629	US\$1,382	US\$38,547
11.9	8.00	1	1	8.00	LF	US\$74,265	US\$0.631	US\$1,328	US\$40,017
15.8	16.0	1	1	8.00	LF	US\$74,432	US\$0.636	US\$1,344	US\$39,759
10.0	16.0	1	4	8.00	LF	US\$75,288	US\$0.638	US\$1,364	US\$40,104
12.6	8.00	1	1	8.00	LF	US\$75,467	US\$0.641	US\$1,337	US\$40,971
10.0	8.00	1	8	8.00	LF	US\$75,529	US\$0.640	US\$1,343	US\$40,881
10.9	16.0	1	1	8.00	LF	US\$75,605	US\$0.643	US\$1,387	US\$39,818
10.9	16.0	1	1	8.00	LF	US\$75,605	US\$0.643	US\$1,387	US\$39,818
18.3	8.00	1	1	8.00	LF	US\$75,721	US\$0.646	US\$1,306	US\$42,021

Figure IV- 22 Résultat final du processus de simulation et d'optimisation

Le système a été simulé pour évaluer ses caractéristiques opérationnelles, la production annuelle d'énergie électrique ; charges électriques annuelles desservies, excès d'électricité, fraction RE, pénurie de capacité, charge non satisfaite, etc. Une stratégie de contrôle de suivi de charge a été suivie dans la simulation. Dans le cadre de cette stratégie, chaque fois qu'un générateur d'électricité est nécessaire, il ne produit que suffisamment d'électricité pour répondre à la demande. La figure(IV-23) montre la production et la demande d'électricité pour le système d'énergie PV-éolien. Les résultats de la simulation montrent que ce système a une production annuelle totale d'énergie électrique de 9310 kWh/an, dans laquelle l'énergie totale produite à partir d'un générateur photovoltaïque est supérieure à l'énergie générée à partir d'une éolienne.

Production	kWh/yr	%
Kyocera KD 145 SX-UFU	5,834	62.7
Generic 1 kW	3,476	37.3
Total	9,310	100

Consumption	kWh/yr	%
AC Primary Load	4,574	100
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Total	4,574	100

Figure IV- 23 Production et demande d'électricité pour le système photovoltaïque-éolien

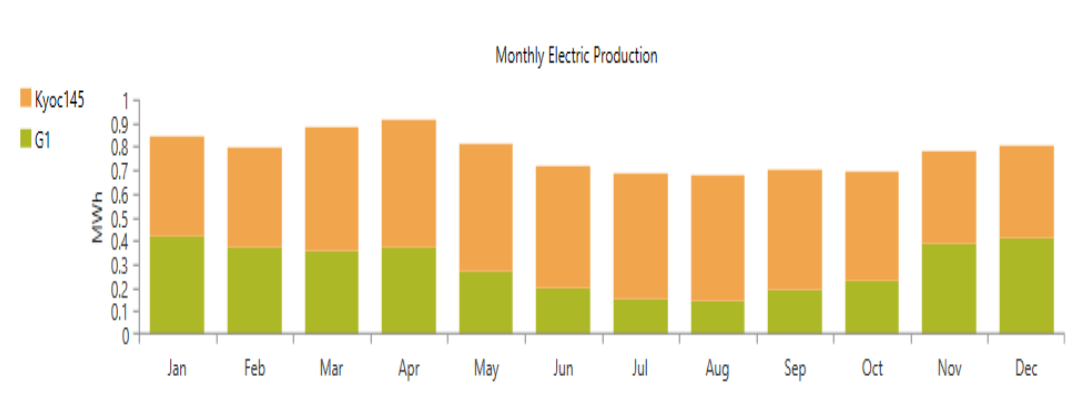
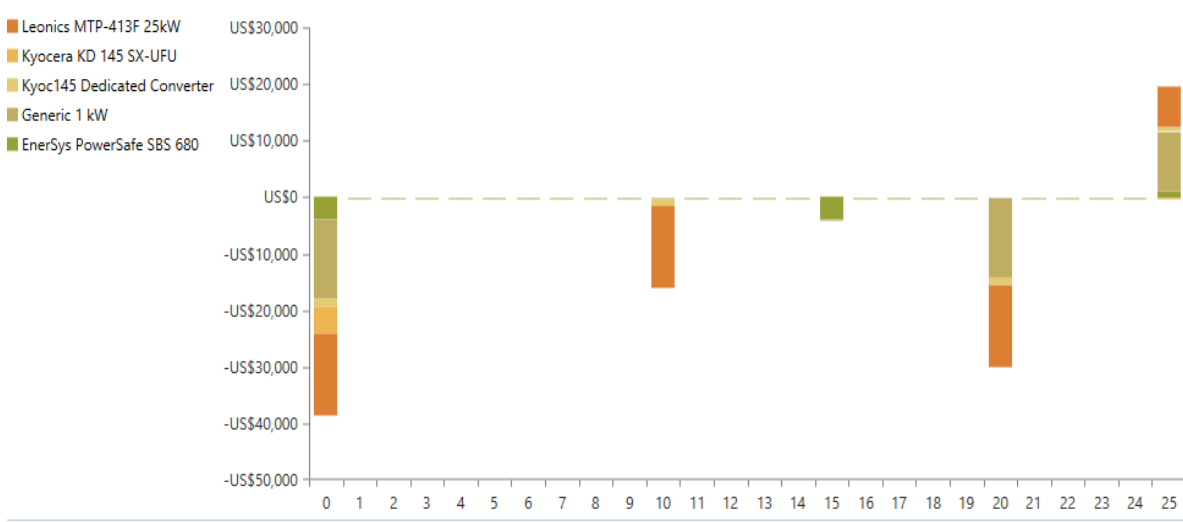


Figure IV- 24 Contribution des unités de puissance pour une utilisation à 100 % des énergies renouvelables

De plus, la part du générateur photovoltaïque et de l'éolienne pour la production électrique de chaque mois de l'année est illustrée dans la figure(IV-24) . Comme on peut le voir, la quantité d'électricité produite par le vent varie de 0,1 kW en aout à près de 0,4 kW en janvier. La figure (IV-23) indique clairement que la quantité d'énergie produite par les panneaux solaires

avec un pourcentage de 62,7% est beaucoup plus importante que la production d'énergie par l'éolienne qui est de 37,3%.



**Figure IV- 25 Projection des flux de trésorerie nominaux par composants**

Les différents flux sortants et entrants tout au long de la durée de vie du projet peuvent être affichés dans **HOMER Pro**, sous forme de tableau ou de graphique. La figure(IV-25) donne les sorties de flux de trésorerie nominaux des composants du type de système considéré.

## Conclusion

L'optimisation des ressources est un facteur majeur dans l'évaluation de l'efficacité des systèmes d'énergie renouvelable. Diverses méthodes sont utilisées par différents chercheurs dans la planification et le dimensionnement des systèmes hybrides photovoltaïques/éoliens connectés au réseau ou hors réseau. Dans cette étude, en utilisant le modèle informatique du logiciel **HOMER Pro**, nous avons déterminé une énergie hybride efficace et économique qui utilise des sources éoliennes et solaires. Sur la base des résultats du processus d'optimisation, le système énergétique optimal comprend des modules PV de 0,145 kW, une éolienne (1 kW), un convertisseur de 25 kW et un nombre de 8 batteries. Le coût de l'énergie (COE) des systèmes étudiés est de 0,6287 US\$/kWh, alors que le capital initial requis et le coût actuel net (CNP) sont respectivement de 1,381,64 US\$ et 74 191,68 US\$. Les résultats de la simulation montrent que ce système a une production annuelle totale d'énergie électrique de 9 310 kWh/an, dans laquelle l'énergie totale produite à partir d'un générateur photovoltaïque est supérieure à l'énergie générée à partir d'une éolienne.

## Bibliographies

- [1] L. O. Aghenta and M. Tariq Iqbal, “Design and dynamic modelling of a hybrid power system for a house in Nigeria,” *Int. J. Photoenergy*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/6501785.
- [2] P. T. Le, “Simulate And Experimentally Evolute A Specific Pv-Based Microgrid System For Replication In Vietnam,” pp. 1–53, 2018, [Online]. Available: <https://semte.engineering.asu.edu/wp-content/uploads/2018/10/t.le-AP-rp.pdf>.
- [3] “HOMER Renewable Energy Microgrid Software | Distributed Power and Microgrid Design Support.” <https://www.homerenergy.com/products/software.html> (accessed Jun. 03, 2021).
- [4] “Climat Tlemcen: Pluviométrie et Température moyenne Tlemcen, diagramme ombrothermique pour Tlemcen - Climate-Data.org.” <https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/tlemcen/tlemcen-990323/> (accessed Jun. 12, 2021).
- [5] “Tlemcen carte géographique gratuite, carte géographique muette gratuite, carte vierge gratuite, fond de carte gratuit, formats graphiques courants frontières, principales villes, routes, noms.” [https://d-maps.com/carte.php?num\\_car=194582&lang=fr](https://d-maps.com/carte.php?num_car=194582&lang=fr) (accessed Jun. 18, 2021).
- [6] “Carte MICHELIN Tlemcen - plan Tlemcen - ViaMichelin.” [https://fr.viamichelin.ch/web/Cartes-plans/Carte\\_plan-Tlemcen--Tlemcen-Algerie](https://fr.viamichelin.ch/web/Cartes-plans/Carte_plan-Tlemcen--Tlemcen-Algerie) (accessed Jun. 18, 2021).

### Conclusion générale

A travers le premier chapitre, nous avons découvert les différents types d'énergies renouvelables, en plus de leurs avantages et inconvénients. En particulier l'énergie solaire et l'énergie éolienne, qui représentent les principaux éléments d'étude dans ce travail. Le chapitre suivant a abordé le sujet de l'étude, qui représentait la définition des concepts et de la dynamique du fonctionnement des énergies hybrides en général. Ainsi que l'intégration de différentes énergies entre elles pour obtenir un rendement énergétique efficace. énergie hybride solaire éolienne. Equipé d'un système de stockage utilisant des batteries a fait l'objet de notre étude en particulier.

Les systèmes d'énergie hybride sont habituellement élaborés pour répondre aux besoins énergétiques de l'électrification des maisons autonome ou l'électrification complète de villages isolés ou de petites îles. Les principales notions liées à la technologie utilisée dans les systèmes hybrides ont été données, ainsi que les différents types d'architectures existants, les outils dimensionnement des systèmes hybrides composés d'un champ PV, éoliennes et le système de stockage d'énergie, une attention particulière a été consacrée à ce type de sources et au stockage. Egalement les problèmes et les stratégies de commande habituelles de ce genre de systèmes ont été présentés.

Dans les deux chapitres trois et quatre nous avons dimensionné un système hybride constitué de systèmes de conversion d'énergie renouvelable, PV, éolien, et d'un système de stockage en utilisant l'outil de simulation le logiciel **HOMER Pro** qui nous a bien aidé dans tout se qui concerne les paramètres métrologiques de la région choisie pour les deux sources solaire photovoltaïque ( le soleil) et éolien (le vent), également le paramètre de température local existante. L'étude de ce système hybride est assignée pour alimenter une charge électrique en basse tension d'un site isolé.

Le système énergétique optimal comprend des modules PV de 0,145 kW, éolienne (1 kW), un convertisseur de 25 kW et un nombre de 8 batteries. Le coût de l'énergie (COE) des systèmes étudiés est de 0,6287 US\$/kWh, alors que le capital initial requis et le coût actuel net (CNP) sont respectivement de 1,381,64 US\$ et 74 191,68 US\$. Les résultats de la simulation montrent que ce système a une production annuelle totale d'énergie électrique de 9310 kWh/an, dans laquelle l'énergie totale produite à partir d'un générateur photovoltaïque est supérieure à l'énergie générée à partir d'une éolienne.