

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Filière : **ELECTROTECHNIQUE**

Spécialité : **ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

Intitulé :

**Gestion optimale et dimensionnement d'un système d'énergie
hybride en site isolé**

Présenté par :

**YAHIAOUI Youssouf
MESSAOUDI Khaled**

Devant le jury composé de :

**Dr. CHERIFI Djamila
Dr. BOUAZZA Saad
Dr. AMARA Mohamed**

Président
Encadreur
Examineur

Promotion 2019-2020

Remerciement

Le travail présenté dans ce projet a été effectué au département d'électrotechnique de l'université Dr. Tahar Moulay de Saïda.

Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos reconnaissance envers **Mr Saad Bouazza** de nous avoir d'abord proposé ce sujet, pour le suivi continuél tout le long de la réalisation de ce travail et pour les conseils qu'il n'a cessé de nous donner et les remarques.*

Nos remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour leurs soutiens moraux et matériels.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ceux qui sont les plus chers du monde :

Mes parents

Mes frères et sœurs.

Toute la famille YAHIAOUI et MENTEFA

À mon binôme Khaled avec qui j'ai partagé ce travail.

Tous mes amis sans exception.

Tous ceux qui veulent lire.

Y. Youcef

Dédicaces

C'est tout plein de joie que je dédie ce travail à ceux qui m'ont été une source d'inspiration et de volonté;

A ma mère et mon père pour leurs encouragements et conseils durant la période de mes études;

que Dieu les protèges.

Je le dédie à mes très chers frères : ALL, HOUARI ,TAYEB et mes très chères soeurs;

A toute ma grande famille MESSAOUDI

À mon binôme YouCeF avec qui j'ai partagé ce travail.

Une dédicace à tous mes amis chacun de son nom

pour tous ceux qui me connaissent;

A tous ceux que j'aime et m'aiment.

MESSAOUDI Khaled

Sommaire

Liste des figures	I
Liste des tableaux	II
Nomenclature – Abréviations	III
Introduction générale	1
Chapitre I	
Généralités sur les énergies renouvelables	
I-1 Introduction	3
I-2 L'énergie solaire	3
I-2-1 Définition	3
I-2-2 Le gisement solaire en Algérie	4
I-3 Position du soleil	5
I-3-1 Coordonnées géographiques terrestres	5
I-3-2 Déclinaison δ	5
I-3-3 Angle horaire du soleil (H)	6
I-3-4 Equation du temps ET	6
I-3-5 Durée du jour	7
I-3-6 Durée d'ensoleillement DI_s d'un capteur (α, γ)	7
I-4 Energie solaire photovoltaïque	8
I-4-1 Définition	8
I-4-2 Principe de fonctionnement	8
I-4-3 Protection d'un GPV	9
I-4-4 Technologie des cellules solaires	10
A) - La cellule amorphe	10
B) - La cellule cristalline	10
B)-1 -La cellule monocristalline	10
B)-2- La cellule poly-cristalline	10
I-4-5 Différent types de système PV	11
I-4-5-1 Système autonome	11
A) Systèmes autonomes avec stockage	11
B) Les systèmes autonomes sans stockage	12

Sommaire

I-4-5-2 Système PV raccordé au réseau	12
I-4-5-3 Système PV hybride	13
I-4-6 Caractéristiques statiques des panneaux	13
I-4-6-1 Influence des résistances série et shunt	13
I-4-6-2 Influence du flux lumineux	15
I-4-6-3 Influence de la température	16
I-4-7 Limites pratiques et atouts des systèmes PV	16
I-4-7-1 Les avantages d'une installation photovoltaïque	16
I-4-7-2 Limites pratiques des systèmes PV	17
I-5 Energie éolienne	17
I-5-1 Définition de l'énergie éolienne	17
I-5-2 Conversion de l'énergie éolienne	17
I-5-3 Historique de l'énergie éolienne	18
I-5-4 Application des éoliennes	18
A) Systèmes Isolés	18
B) Systèmes Hybrides	19
C) Systèmes connectés au Réseau	19
I-5-5 Architecture d'une éolienne à axe horizontal	19
A) Rotor	20
B) Nacelle	20
C) Tour	20
I-5-6 Caractéristiques des éoliennes	20
I-5-6-1 Eolienne à axe horizontal	20
I-5-6-2 Eolienne à axe vertical	21
I-5-7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	22
I-6 Générateur Diesel	22
I-6-1 Description d'un Générateur Diesel	22
I-6-1-1 Reserve tournante	23
I-6-1-2 Temps de fonctionnement minimal	23
I-6-1-3 Hystérésis	23

Sommaire

I-7 Conclusion	23
-----------------------	----

Chapitre II

Etat de l'art sur le système d'énergie hybride

II-1 Introduction	24
II-2 Définition	24
II-3 Le but du système hybride	24
II-4 Classification	25
II-4-1 Le régime du fonctionnement	25
II-4-2 La structure du système hybride	25
II-5 Etudes des systèmes hybrides	25
II-6 Configuration de bus dans les systèmes hybrides	26
II-6-1 Architecture à bus à CC	26
II-6-2 Architecture mixte à bus à CC/CA	28
II-7 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH	29
II-8 Descriptions des composantes du système hybride	32
II-8-1 Générateurs photovoltaïques	32
II-8-2 Générateur éolien	32
II-8-3 Générateur diesel	33
II-8-4 Les Systèmes de stockage	34
II-8-4-1 Les Batteries	34
II-8-4-2 Les piles à combustible	34
II-8-5 Système de supervision	35
II-8-6 Convertisseurs	35
II-8-7 Charges	35
II-9 Conclusion	35

Chapitre III

Evaluation des gisements relatifs au PV/Eolien

III-1 Introduction	36
III-2 Rayonnement solaire	36
III-2-1 Ses composantes	36
III-2-2 Le nombre d'air mass	37
III-2-3 Unités utilisées	37

Sommaire

A) L'éclairement (ou irradiance)	37
B) L'irradiation (ou rayonnement)	37
III-2-4 Instruments de mesure	38
A) L'héliographe	38
B) Le pyranomètre	38
C) Le pyréliomètre	38
III-3 Notions théoriques sur l'éolien	40
III-3-1 Loi de Betz	41
III-3-2 Vitesse spécifique ou normalisée	42
III-3-3 Coefficient de puissance	43
III-3- 4 Coefficient de couple	44
III-3-5 Distribution de Weibull	44
➤ Autres applications relatives à la caractérisation éolienne	45
III-4 Présentation du site	46
III-4-1 L'emplacement du système hybride	46
III-4-2 Détails de la charge	47
III-4-3 Données météorologique	48
III-4-3-1 Variation mensuelle de l'irradiation	48
III-4-4 Données de la Vitesse du Vent	49
III-4-4-1 Répartition Régionale de la Vitesse du Vent	49
III-4-4-2 Variation quotidienne et annuelle de la vitesse du vent	49
III-4-5 Données de la température	49
III-5 Conclusion	50
Chapitre IV	
Présentation du logiciel HOMER	
IV-1 Introduction	51
IV-2 Analyse du logiciel HOMER	51
IV-2-1 Définition de logiciel HOMER	51
IV-3 Un logiciel spécialisé pour l'optimisation économique	51
IV-4 Les paramètres	52
IV-4-1 Paramétrage des sources	52
IV-4-2 Paramétrage de l'unité de stockage	53

Sommaire

IV-4-3 Paramétrage du gisement et des charges	53
IV-4-4 Autres paramétrages	53
IV-5 Interfaces	54
IV-6 Données d'entrée	57
IV-7 Résultats pouvant être obtenus	58
IV-8 Méthodologies spécifiques aux simulations	61
IV-9 Les sorties	62
IV-10 Le fonctionnement	62
IV-11 Conclusion	63

Chapitre V

Simulation dans le HOMER

V-1 Introduction:	64
V-2 Schéma de conception du système hybride	65
V-3 Simulation des composants de système	65
V-3-1 Choix du générateur	65
V-3-2 Choix des PV	67
V-3-3 Choix des éoliennes	69
V-3-4 Choix des batteries	70
V-3-5 Choix des convertisseurs	71
V-4 Courbe de charge du site étudié	72
V-5 Simulation du système d'énergie hybride	73
V-5-1 Résultats de simulation	73
V-5- 2 Etude techno-économique	75
V-5-3 Production et consommation d'énergie électrique	76
V-5-4 Comparaison entre les deux systèmes	77
➤ Sur le plan économique	77
➤ Sur le plan écologique	77
V-6 Conclusion	78
Conclusion Générale	79
Référence Bibliographie	80

Liste des figures

Figure I-1 : Les deux types d'énergie solaire	4
Figure I-2: La carte d'éclairement solaire de l'Algérie	4
Figure I-3 : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné	5
Figure I-4 : Système Photovoltaïque	8
Figure I-5: Schéma synthétique de l'échelle de la cellule	9
Figure I-6: Effet photovoltaïque à l'effet photovoltaïque	9
Figure I-7 Système PV autonome ou isolé	11
Figure I-8: Système PV raccordé au réseau sans batterie	12
Figure I-9: Système PV hybride	13
Figure I-10: Schéma d'une cellule élémentaire	14
Figure I-11: Influence des résistances série et shunt sur les caractéristiques	14
Figure I-12: Caractéristiques courant- tension d'une cellule PV	15
Figure I-13: Influence de la température	16
Figure I-14: Conversion de l'énergie cinétique du vent	18
Figure I-15: Composants d'une éolienne.	19
Figure I-16: Eoliennes à axes horizontal	20
Figure I-17: Eolienne amont et aval	21
Figure I-18: Eoliennes à axes vertical	21
Figure I-19: Configuration de générateur diesel	22
Figure II-1: Classification des systèmes hybrides	26
Figure II-2: Petits systèmes de puissance CA avec composants couplés du côté CC	26
Figure II-3 : Configuration du SEH à bus CC	27
Figure II-4 : Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA	28
Figure II-5: Synoptique des échanges d'énergie dans un système multi-sources	30
Figure II-6: Synoptique d'une installation expérimentale - Système de production hybride éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un stockage de l'énergie	30
Figure II-7: Configuration du générateur diesel	33
Figure III-1 : Les composants du rayonnement solaire	36
Figure III-2: Pyranomètre doté de ses caractéristiques	39
Figure III-3: Anémomètre à coupelle doté de ses caractéristiques	40

Liste des figures

Figure III-4: Appareil de mesure hybride solaire-éolien	40
Figure III-5 : Colonne d'air animée d'une vitesse V	41
Figure III-6 : Théorie de Betz : Schéma de principe.	42
Figure III-7: Vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aubage Ωr	43
Figure III-8: Exemple de la distribution de Weibull	45
Figure III-9: Exemple de la rose des vents	45
Figure III-10: Carte de l'irradiation journalière reçue sur une surface horizontale	46
Figure III- 11 : Répartition journalière de la charge électrique	47
Figure III- 12 : L'ensoleillement mensuel moyen El-kheiter	48
Figure III- 13 : Les régions ventées en Algérie	49
Figure IV-1: Interface HOMER – Fichier vierge	52
Figure IV-2: Interface HOMER – Équipements à ajouter	53
Figure IV-3: Interface HOMER – Équipements sélectionnés	54
Figure IV-4: Interface HOMER – Ressources	54
Figure IV-5: Interface HOMER – Fichier complété	55
Figure IV-6: Interface HOMER – Résultats des calculs	56
Figure IV-7: Données à fournir	57
Figure IV-8: Résultats obtenus après simulation	57
Figure IV-9: Résumé des résultats	58
Figure IV-10: Fenêtre des résultats détaillés	59
Figure V-1: Montage électrique du système hybride	65
Figure V-2: Les données du coût du GD	65
Figure V-3: Courbe de consommation de carburant du GD	66
Figure V-4: Profil journalier de la production du GD	66
Figure V-5: Production journalière moyenne du Diesel pour toute l'année	67
Figure V-6: Les données du coût du PV	67
Figure V-7: Courbe du coût du PV	68
Figure V-8: Puissance journalières moyennes délivrées par le PV	68
Figure V-9: Production mensuelles moyenne du PV	69
Figure V-10: Les données du coût d'éolien	69
Figure V-11: Caractéristique de puissance de l'éolienne choisie en fonction de la vitesse du vent	69
Figure V-12: Puissance journalières moyennes délivrées par la turbine éolienne	70

Liste des figures

Figure V-13: DMap de la puissance éolienne produite	70
Figure V-14: Les données du coût de la batterie	71
Figure V-15: Les données du coût du convertisseur	71
Figure V-16: Profil journalier de la courbe de charge	72
Figure V-17: Le profil de charge dans une année	72
Figure V-18: Le profil de charge journalière suivant les saisons	72
Figure V-19: Evolution horaire annuelle, de la demande et la production	73
Figure V-20: Résumé des coûts pour le système hybride	75
Figure V-21: Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source	76

Liste des tableaux

Tableau II-1: Classification des SEH par gamme de puissance.	24
Tableau II-2: Les différents types de PC.	34
Tableau III-1: Distribution journalière de la charge électrique.	47
Tableau III-2: Potentiel solaire à El-Kheiter.	48
Tableau III-3: Moyennes mensuelles de la vitesse du vent à El-Kheiter.	49
Tableau III-4: Données des températures ambiantes El-kheiter.	50
Tableau V-1: Propriétés physiques du diesel.	66
Tableau V-2 : Résultat d'optimisation.	74
Tableau V-3: Classement des systèmes par HOMER.	74
Tableau V-4: Les différentes configurations d'optimisation de site EL-Kheiter.	75
Tableau V-5: Coût de l'installation.	76
Tableau V-6: Energie annuelle produite.	76
Tableau V-7: Comparaison entre les deux systèmes sur le plan économique.	77
Tableau V-8: Quantité de gaz à effet de serre émise par le GD du système optimal et celle émise par le GD seul.	77

Abbreviations - Nomenclature

Abbreviations

PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque
SEH	Systèmes Hybrides
CC	Le Courant Continu
CA	Le Courant Alternatif
GD	Générateur Diesel
NASA	The National Aeronautics and Space Administration
UTC	Le temps universel coordonné
HOMER	Hybrid Optimisation Model for Electric Renewable
CDER	Le Centre de Recherche en Energies Renouvelables
KW	Kilo Watt

Nomenclature

TSV	Temps solaire vrai = temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi
TSM	Temps Solaire Moyen c'est le temps qui " s'écoule " à vitesse constante de la Terre sur son orbite au cours de l'année (celui mesuré par les horloges).
DE	Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich
T _L	Temps légal = temps donné par une montre
E _t	Correction de l'équation du temps [heure]
δ	Déclinaison du soleil [°]
H	Angle horaire du soleil [°]
λ	Longitude du lieu.
N	Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.
θ	l'attitude de lieu [°].
H _c	Le coucher correspond à la valeur positive
H _L	Le lever à la valeur négative
D _{Is}	Durée d'ensoleillement
V _M	La tension aux bornes max (m/s)

Nomenclature - Abréviations

I_M	Le courant parcourant max [A]
V_{CO}	la tension de circuit ouvert (m/s)
I_{CC}	Le courant de court-circuit [A]
ρ	Densité volumique de l'air (Kg/m ³)
V	vitesse du vent (m/s)
V_1	Vitesse d'air en amont de l'éolienne
V_2	Vitesse d'air en aval l'éolienne
E_c	Energie cinétique du vent (Joules).
ΔE_c	la variation de l'énergie cinétique
P_{aer}	la puissance aérodynamique de l'éolienne
S	la section balayée par les pales de l'éolienne (m ²)
F	la force de l'air
C_p	le coefficient de puissance de l'éolienne
C_m	le coefficient de couple
R_t	Rayon de la surface balayée (m)
Ω_t	Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s).
T_t	Couple de la turbine éolienne (N.m).
F	Fonction de connexion [-].
T_j	Température des panneaux photovoltaïques [°C].
A_p	Coefficient de température de la puissance [% /°C].
C	Facteur d'échelle de Weibull
K	Facteur de forme de Weibull

Introduction Générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays émergents auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

Le recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus pour la production d'électricité, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluants. Ainsi, la production électrique à partir de ces combustibles est à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO₂.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire [1]. Mais dans les pays industrialisés, dès le dix-neuvième siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses.

Ces énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays couvre certains de ses besoin en énergie solaire. [2]

Tandis que l'énergie éolienne qui représente un potentiel important au désert et les hauts plateaux (**El-Kheiter**), donne une autre extension pour notre pays pour se diversifier au point de production d'électricité d'origine renouvelable dans la décennie à venir.

Le rôle d'un système hybride (diesel/éolien/photovoltaïque) de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces

Introduction Générale

quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté. [2]

L'utilisation de source de vent et de soleil induit le concept de stockage d'électricité en raison de la disponibilité intermittente de telles ressources .l'utilisation du stockage d'électricité est très diversifiée: les applications stationnaires connectée ou non au réseau. En particulier, les sites géographiquement isolés et non raccordés au réseau intégrant une source renouvelable. [1]

Le générateur d'électricité d'origine renouvelable sélectionné pour notre étude est le système hybride diesel/éolien/photovoltaïque. C'est dans ce contexte que vient s'insérer cette étude qui constitue une contribution pour une meilleure gestion des sources d'énergies renouvelables dans un système d'énergie hybride. Le but de notre travail est l'étude et la gestion d'un système d'énergie hybride avec stockage dans un site isolé.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en cinq chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion général.

- Dans le premier chapitre, une généralité sur les différentes sources renouvelables (photovoltaïques et éoliennes) et le générateur Diesel.
- Le deuxième chapitre est consacré l'état de l'art sur le système d'énergie hybride.
- Le troisième chapitre présente une étude sur l'évaluation des gisements relatifs au PV/éolien.
- Dans le quatrième chapitre, on donne une présentation du logiciel HOMER.
- Le cinquième chapitre, présente la partie simulation en utilisant le logiciel HOMER.
- Et nous terminerons par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les énergies renouvelables

I-1 Introduction:

Les énergies renouvelables sont des énergies dont la source est illimitée et non polluante et leur exploitation cause moins de dégâts écologiques, c'est-à-dire : l'ensoleillement, le vent, le mouvement de l'eau dans les cours d'eau ou les mers, etc....

Pour de très nombreuses applications d'intérêt très sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les maisons rurales, etc..... hors-réseau d'électricité conventionnel, la disponibilité permanente de la source primaire d'énergie est vitale et conditionnée dans une très large mesure, la fiabilité des installations et leur fonctionnement permanent.

Les nouvelles solutions technologiques proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono-source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif. [3]

I-2 L'énergie solaire :

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente avec l'alternance jour / nuit...

La source d'énergie renouvelable la plus abondante est sans aucun doute l'énergie solaire. Le Soleil envoie sur Terre une puissance de 90.000 térawatts (TW), à comparer aux 14 TW consommés par la population mondiale, et va continuer à le faire pendant quelques milliards d'années. Cependant, en raison de son caractère intermittent et de sa faible densité, il est capital de pouvoir stocker et concentrer cette énergie solaire sous forme de carburant. [4]

I-2-1 Définition:

L'énergie solaire est la source énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables.

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique. [5]

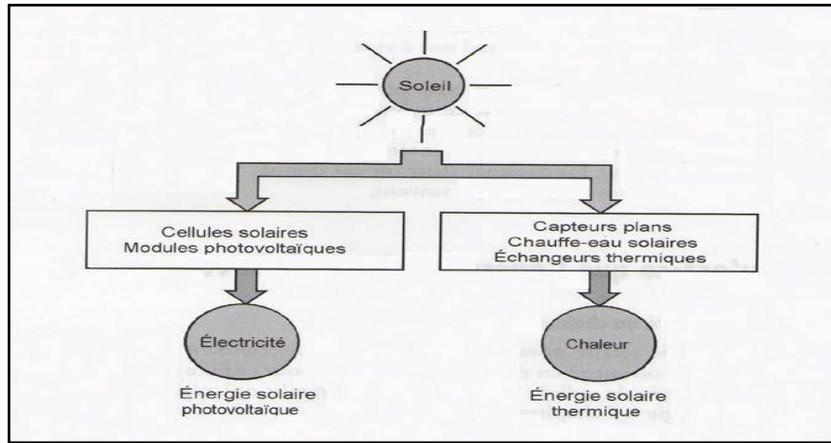


Figure I-1 : Les deux types d'énergie solaire.

I-2-2 Le gisement solaire en Algérie:

Pour saisir la portée des énergies renouvelables en Algérie et les enjeux considérables et inépuisables existant de ces énergies non encore exploitées à savoir le gisement solaire exceptionnel qui couvre une superficie de 2381745 Km² L'Algérie est l'un des pays qui ont une diversité de sites du à son grand secteur, où le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les zones du nord de l'Algérie sont à ciel - couvert plus que ceux du sud.

Les régions Sahariens reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En raison de cette diversité dans le climat, l'ensoleillement moyen global au plan horizontal reçu varie entre 4,5 et 7.5 kWh/m². En tenant compte de cette diversité, l'Algérie peut être divisée en 8 zones climatiques qui ont approximativement un ensoleillement homogène comme indiqué sur la figure I-2 : [6]

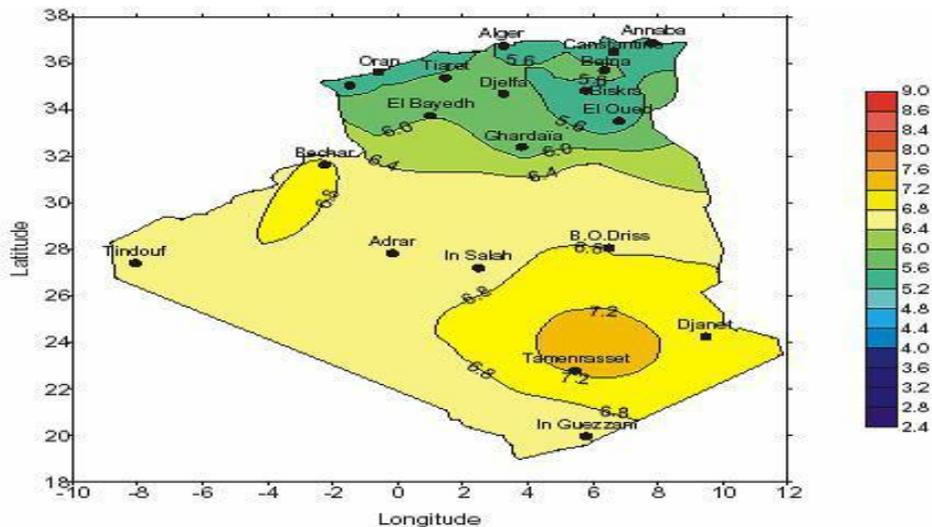


Figure I-2: La carte d'éclairement solaire de l'Algérie.

I-3 Position du soleil: [7]

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Pour récupérer le maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est primordiale.

I-3-1 Coordonnées géographiques terrestres:

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre.

Latitude ϕ : Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord, et est négative dans l'hémisphère sud.

Longitude λ : Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'ouest et est négative à l'est de la méridienne origine.

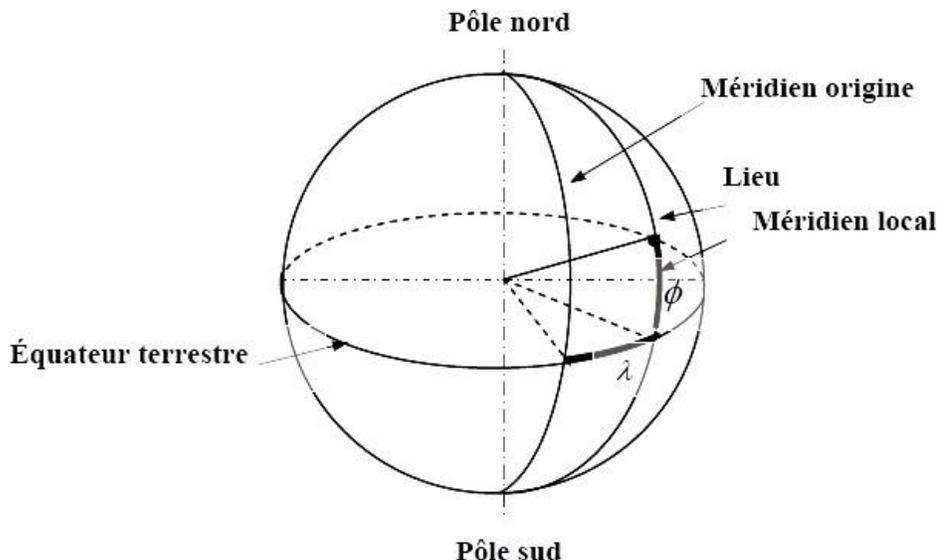


Figure I-3 : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné.

I-3-2 Déclinaison δ :

C'est l'angle formé par le vecteur Soleil Terre avec le plan équatorial. Elle est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan écliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre), et maximale aux solstices d'été (22 juin) et d'hiver (22 décembre).

La variation journalière de la déclinaison est d'environ de $0,5^\circ$. Elle est calculée parue équation simple approximative :

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{360}{365} (284 + n) \right) \quad (1)$$

δ : Déclinaison du soleil

n : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.

Ou par une série de Fourier :

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \beta + 0.070257 \sin \beta - 0.00678 \cos 2\beta + 0.000907 \sin 2\beta - 0.002697 \cos 3\beta + 0.00148 \sin 3\beta) \left(\frac{180^\circ}{\lambda} \right) \quad (2)$$

I-3-3 Angle horaire du soleil (H):

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction de méridien du lieu
l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation :

$$H = 15 \cdot (TSV - 12) \quad (3)$$

$$TSV = TL - DE + \left(\frac{E_t + 4\lambda}{60} \right)$$

$$E_t = 9.87 \sin 2N' - 7.35 \cos N' - 1.5 \sin N'$$

$$N' = \frac{360}{365} (N - 81)$$

$$DE = +1$$

DE : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich

TSV : Temps solaire vrai = temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi

TL : Temps légal = temps donné par une montre

Et : Correction de l'équation du temps

λ : Longitude du lieu.

L'angle horaire H varie de -180° à $+180^\circ$.

On prend :

$H > 0$: après midi

$H < 0$: le matin

$H = 0$: midi TSV

I-3-4 Equation du temps ET:

C'est l'écart entre le temps solaire moyen TSM et le temps solaire vrai TSV selon le jour de l'année considérée.

$$ET = TSV - TSM \quad (4)$$

Avec :

TSV : Temps Solaire Vrai c'est le temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi

TSM : Temps Solaire Moyen c'est le temps qui " s'écoule " à vitesse constante de la Terre sur son orbite au cours de l'année (celui mesuré par les horloges).

La variation de ET durant l'année est donnée par la formule suivante :

$$ET = 0.258 \cos x - 7.41 \sin x - 3.64 \cos 2x - 9.228 \sin 2x \quad (5)$$

Avec :

$$X = \left(\frac{365(N-1)}{360 \cdot 25} \right) \quad (6)$$

Où l'angle X est défini en fonction du numéro du jour N . Le décompte commence à partir du 1er janvier où $N=1$.

I-3-5 Durée du jour:

Le jour est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donne une hauteur h du soleil nulle sont appelés: le lever et le coucher du soleil .La relation donnant la hauteur du soleil peut s'écrire :

$$\sin h = \cos \delta \sin H + \cos \delta \sin \theta \quad (7)$$

Avec :

δ : Déclinaison du soleil

H : l'angle horaire du soleil

θ : L'attitude de lieu

Le coucher correspond à la valeur positive H_C et le lever à la valeur négative H_L .

$$H_C = \arccos(-\tan \delta \tan \theta)$$

$$H_L = -H_C$$

$$D_j = \frac{H_C - H_L}{15} = \frac{2}{15} \arccos \quad (8)$$

Avec :

$$T = -\tan \delta * \tan \theta$$

I-3-6 Durée d'insolation DIs d'un capteur (α, γ):

La durée d'insolation (DIs) est la durée effective d'insolation d'un capteur mesurée par héliographe et définie à partir d'un seuil minimum ($\approx 250 \text{w/m}^2$).

Pour un plan (α, γ), un lieu ϕ et un jour donné, i est uniquement fonction de l'angle horaire H , on exprimera donc $\cos i$ en faisant bien apparaître la variable H .

$$\cos(i) = A \sin(H) + \cos(H) + C \quad (9)$$

I-4 Energie solaire photovoltaïque:

I-4-1 Définition:

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui, réalisent cette transformation d'énergie.

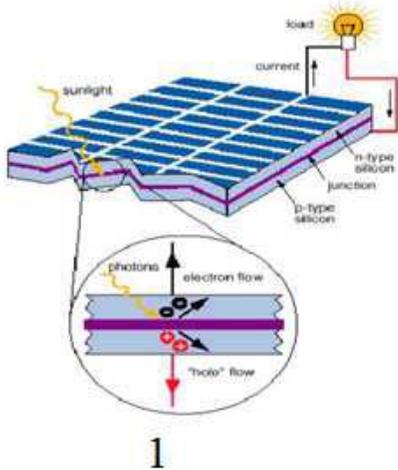
L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau de rayonnement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. [5]



Figure I-4 : Système Photovoltaïque.

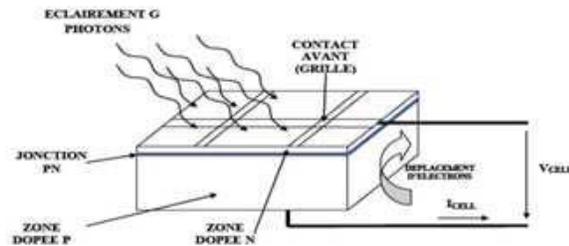
I-4-2 Principe de fonctionnement:

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie obtenue par la conversion de la lumière en électricité. Cette énergie est obtenue grâce au phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. Rapporté par **Edmond Becquerel** en 1839, le principe est assez simple et consiste en l'émergence d'une différence de potentiel aux extrémités d'une structure de matériel semi-conducteur, produit par l'absorption de la lumière.



1

Figure I-5: Schéma synthétique de l'échelle de la cellule.



2

Figure I-6: Effet photovoltaïque à l'échelle de la cellule.

Plus précisément, comme le montre la figure (I-5), l'effet Photovoltaïque est propre à la cellule (unité fondamentale de conversion). Dans le cas des panneaux photovoltaïques, les cellules sont réalisées à partir de deux couches de silicium, une dopée P (en général dopée au bore) et l'autre dopée N (en général dopée au phosphore). Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension ainsi générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. [8]

I-4-3 Protection d'un GPV: [9]

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnement. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- ❖ la protection en cas de connexions en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- ❖ La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass).

I-4-4 Technologie des cellules solaires: [10]

Les technologies des cellules solaires se divisent en deux grandes familles :

A) - La cellule amorphe :

Les coûts de fabrication sont sensiblement meilleurs que ceux du silicium cristallin. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une alternative économique est recherchée, ou, quand très peu d'électricité est nécessaire (par exemple, alimentation des montres, calculatrices, luminaires de secours). Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir. Cependant, le rendement est de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin. Les cellules en silicium amorphe sont actuellement de moins en moins utilisées : 9,5 % de la production mondiale en 2000, alors qu'elles représentaient 12 % en 1999.

D'autres techniques semblent gagner du terrain aujourd'hui, ce sont les technologies en ruban et les couches minces.

B) - La cellule cristalline (qu'il soit mono ou poly) :

Est une technologie éprouvée et robuste (espérance de vie : 30 ans), dont le rendement est de l'ordre de 13 %. Ces cellules sont adaptées à des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. Elles représentent près de 80 % de la production mondiale en 2000.

B)-1 La cellule monocristalline :

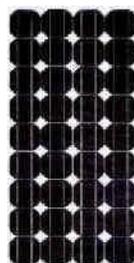
Sont des cellules qui s'approche le plus du modèle théorique, elle est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie, plus onéreux, il est cependant plus efficace que la cellule poly-cristalline

B)-2 La cellule poly-cristalline :

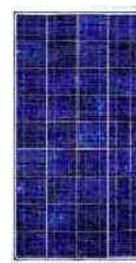
Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées : elles représentent 49 % de l'ensemble de la production mondiale en 2000. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication, leurs rendements est de 13% jusqu'à 20% en labo.



Cellule amorphe



Cellule monocristalline



Cellule poly-cristalline

I-4-5 Différent types de système PV:

I-4-5-1 Système autonome :

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit : [1]

- ❖ Des systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.
- ❖ Des systèmes photovoltaïques sans stockage (au fil du soleil).

A) Systèmes autonomes avec stockage:

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée (figure I-7). Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques. [1]

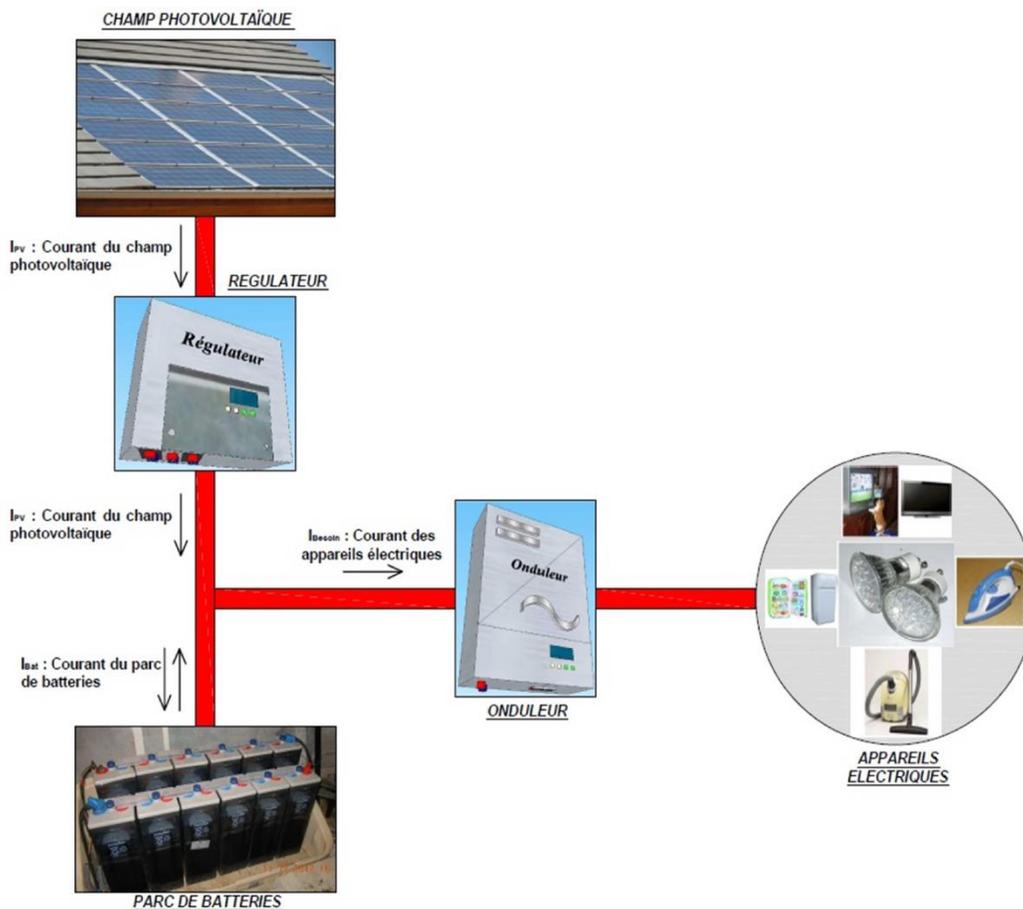


Figure I-7 Système PV autonome ou isolé.

B) Les systèmes autonomes sans stockage :

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible.

Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonomes où le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique. La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable et en fonction du rayonnement solaire.

I-4-5-2 Système PV raccordé au réseau :

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (Sonelgaz en Algérie). Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement. On peut distinguer des systèmes PV raccordés aux réseaux avec et sans batteries de stockage.

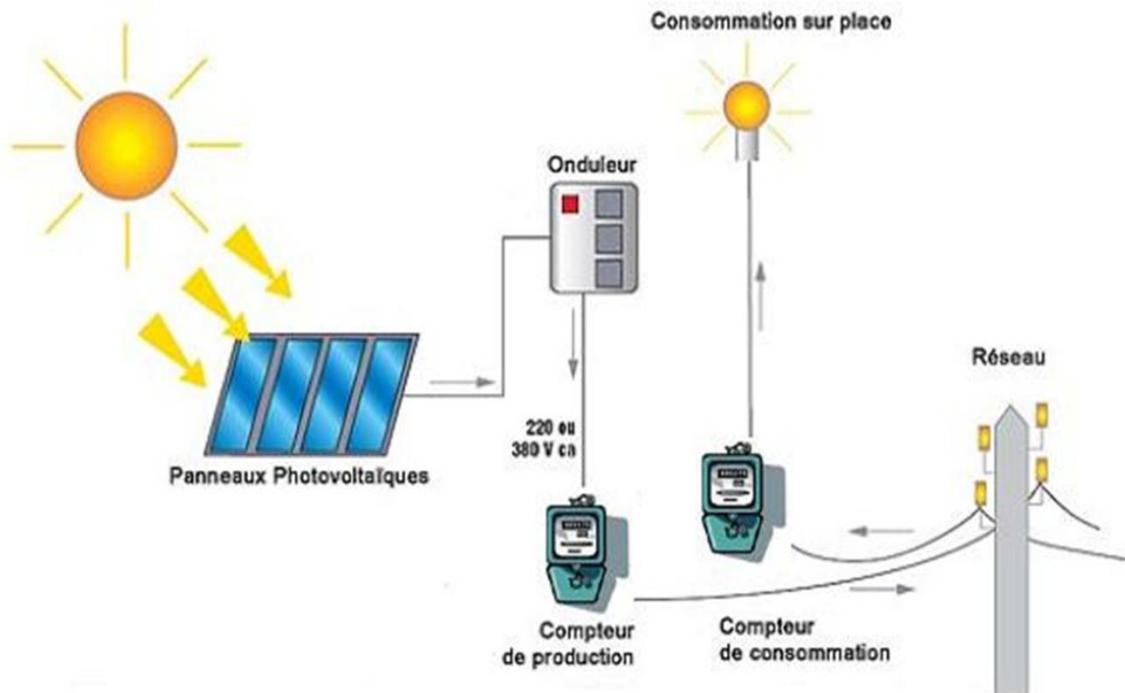


Figure I-8: Système PV raccordé au réseau sans batterie.

I-4-5-3 Système PV hybride :

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et même parfois le réseau public d'électricité.

En général, un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires telles que le solaire ou l'éolien. La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (gazoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours.

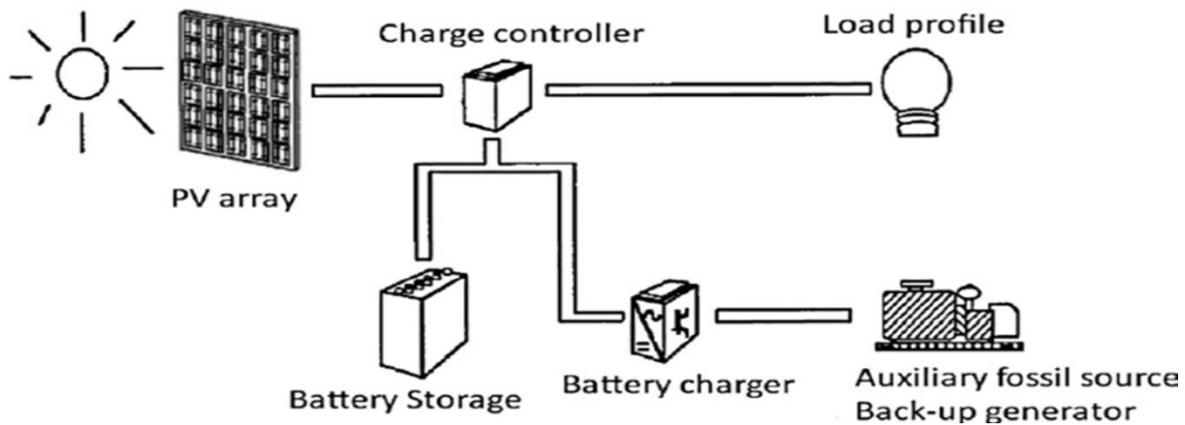


Figure I-9: Système PV hybride.

I-4-6 Caractéristiques statiques des panneaux:

De nombreux constructeurs offrent une gamme importante des panneaux PV. On prend l'exemple d'un module Axitec, AC-150P/13S, Photon Mag, dont les caractéristiques complètes sont reportées en annexe. Telle qu'elle a été représentée, une cellule photovoltaïque est un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à celui d'une source de courant shuntée par une diode.

[11]

I-4-6-1 Influence des résistances série et shunt:

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. Cependant, il est possible, sous certaines hypothèses de dégager des valeurs limites acceptables (R_{sI}, R_{shI}).[12]

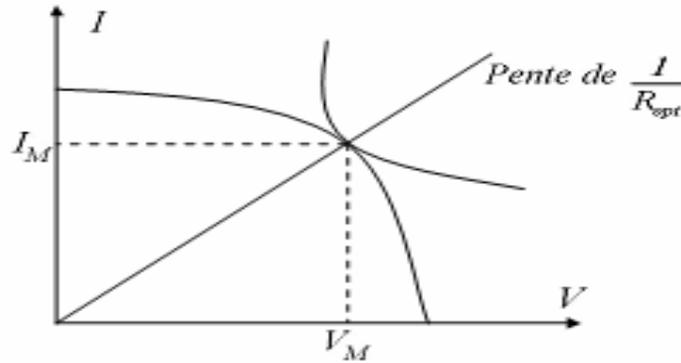
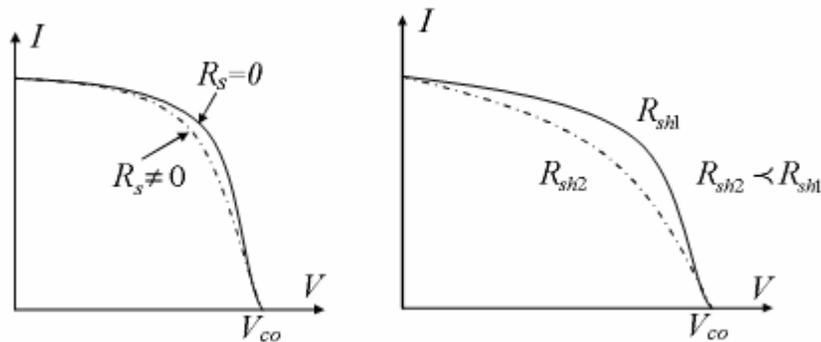


Figure I-10: Schéma d'une cellule élémentaire.



a) Influence de la résistance série b) Influence de la résistance shunt

Figure I-11: Influence des résistances série et shunt sur les caractéristiques.

En effet, si on suppose que la cellule est en régime optimal, et si les pertes sont attribuées à la résistance série, le rapport de la puissance dissipée dans celle-ci à la puissance délivrée par la cellule est donnée par :

$$Q_{RS} = \frac{R_s I_M^2}{I_M V_M} = \frac{R_s I_{cc}}{V_{co}} \tag{10}$$

Où :

V_M et I_M sont respectivement tension aux bornes et courant parcourant, max ;

I_{cc} et V_{co} représente respectivement, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

De même, si on attribue toutes les pertes à la résistance shunt, et en supposant qu'on est au point de fonctionnement optimal, on aura:

$$Q_{RS} = \frac{\frac{V_M^2}{R_{sh}}}{I_M V_M} = \frac{V_{co}}{R_{sh} I_{cc}} \tag{11}$$

La figure I-11- a) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule. La courbe en pointillés correspond à une valeur non nulle de RS . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe $I=f(V)$ dans la zone où la cellule fonctionne comme source de

tension (à droite du point M de la figure- (I-10)). La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule.

Quant à la résistance shunt, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs du courant. La figure- I-11-b) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant (à gauche du point M de la figure- (I-10)). Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée.

I-4-6-2 Influence du flux lumineux:

Le photo-courant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou aux flux lumineux E_s . Le courant $I_d(V_d)$ étant par définition le courant direct de la jonction sous obscurité, est normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous de faibles concentrations. En effet, la densité des porteurs de charge et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de température et de la concentration de l'éclairement. [11]

Le photo-courant créé dans une cellule photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface de la jonction soumise au rayonnement solaire ; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée.

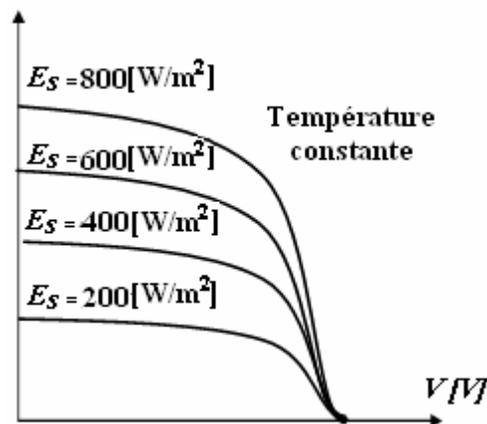


Figure I-12: Caractéristiques courant- tension d'une cellule PV.

La figure- (I-12) représente les caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque sous diverses valeurs d'éclairement. A chacune de ces valeurs de E_s , correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert V_{Co} , suite à une chute du flux lumineux.

I-4-6-3 Influence de la température:

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente à peu près de 3.10^{-2} [mA.K⁻¹ / cm²] de cellule. Par contre, le courant I augmente très rapidement avec T . il engendre une diminution de la tension du circuit ouvert V_{CO} . Cette diminution est de l'ordre de 2 [mV/°], comme le montre la figure (I-13). L'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, d'un ordre de 5.10^{-5} [W/K/cm²] de cellule, soit une variation de $0,35$ [% /°]. Le paramètre T peut être intégré dans l'équation caractéristique (I/V) d'une simple cellule PV, comme le montre **Sukamongkol** dans; [13]

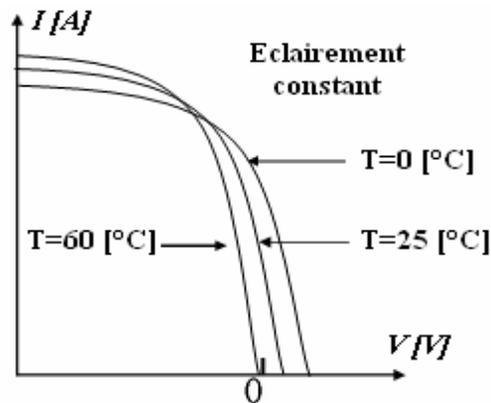


Figure I-13: Influence de la température.

$$I = I_{sc} \frac{Es}{1000} + \alpha p(T - T_{réf}) - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{n_j K T}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (12)$$

αp étant le coefficient de température [% /°C] et T la température de jonction des cellules [K].

I-4-7 Limites pratiques et atouts des systèmes PV:**I-4-7-1 Les avantages d'une installation photovoltaïque:**

Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages, dont les suivants :

- ✓ Ils sont de fonctionnements sûrs, non polluants et silencieux ; L'utilisation de l'énergie solaire permet d'éviter l'utilisation d'énergies fossiles ou nucléaires pour fabriquer la même quantité d'électricité et donc de diminuer d'autant les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires.

De manière générale, 100 [m²] de capteurs évitent la consommation d' 1 [tep] d'énergies fossiles.

Une production d' 1 [MWh] permet de substituer $0,086$ [TEP] d'énergie et d'éviter l'émission de 120 [kg] de CO₂. Il n'y a pas de pièce en mouvement, ni de bruit et pas de production polluants.

Sur la base de 108 [g] de CO₂ émis par kWh électrique produit, la quantité de CO₂ évitée est de près de 4 [tonnes /an].L

- ✓ Ils sont très fiables;
- ✓ Ils n'exigent presque aucun entretien;
- ✓ Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales;
- ✓ Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre aux besoins en matière d'électricité;
- ✓ Ils donnent une autonomie accrue – fonctionnement indépendant du réseau ou système de secours pendant les pannes d'électricité ;
- ✓ Production d'électricité décentralisée.

I-4-7-2 Limites pratiques des systèmes PV:

- ☒ Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie comme le chauffage. S'il est souhaité d'utiliser l'énergie solaire à cette fin, il sera préférable de considérer d'autres solutions de recharge comme une chauffe eau solaire, qui produit de la chaleur beaucoup plus efficacement.
- ☒ Les systèmes raccordés au réseau sont rarement de la technologie PV. Étant donné que ces systèmes peuvent être coûteux, le choix d'un système photovoltaïque dépend souvent d'une décision personnelle axée sur le style de vie – tout comme le type de maison ou de voiture que vous pourriez avoir. [11]

I-5 Energie éolienne:

I-5-1 Définition de l'énergie éolienne:

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies la renouvelables. [14]

I-5-2 Conversion de l'énergie éolienne:

La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes : au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique.

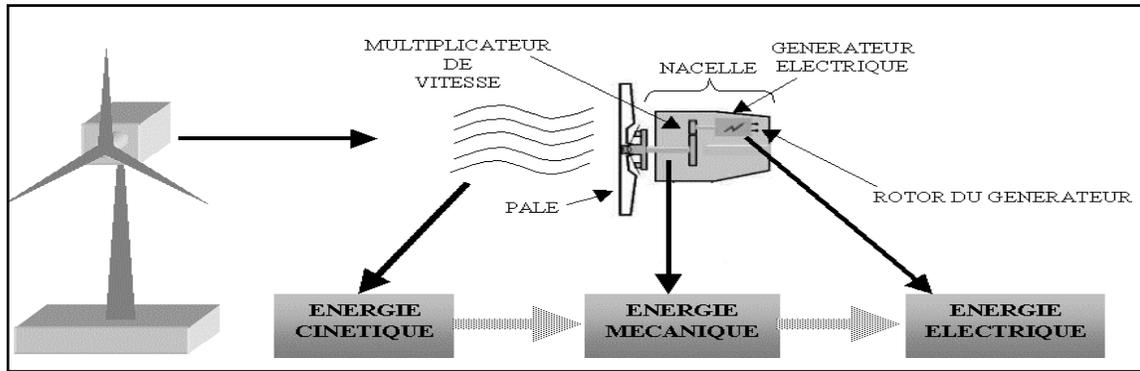


Figure I-14: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I-5-3 Historique de l'énergie éolienne:

L'énergie éolienne est l'une des plus vieilles énergies de la terre. Le vent fût utilisé pendant plusieurs siècles pour la propulsion des navires, il présentait presque la seule source d'énergie pour les navires jusqu'à ce que WATT a inventé le moteur à vapeur dans le dix-huitième siècle.

L'histoire nous apprend qu'au dix-septième siècle A.J.C, l'empereur de Babylone, **HAMMURABI**, avait conçu un système d'irrigation basé sur l'énergie éolienne. Trois siècles A.J.C, L'Egyptien HERO d'Alexandrie avait décrit une simple turbine éolienne à axe horizontal à quatre pales pour getter des organes. Les perses utilisaient en septième siècle des éoliennes rudimentaires à axe vertical qui servait à l'irrigation des terres cultivées et au meulage du grain. [15]

I-5-4 Application des éoliennes :

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- ❖ Systèmes isolés.
- ❖ Systèmes hybrides.
- ❖ Systèmes reliés au réseau.

Les systèmes obéissent à une configuration de base : ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage:

A) Systèmes Isolés:

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par Exemple :

- ❖ pour produire de l'électricité dans les îles.
- ❖ pour le pompage de l'eau dans des champs.
- ❖ Pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises.

Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la

batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes. Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur. [16]

B) Systèmes Hybrides:

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple :

- ❖ turbines éoliennes.
- ❖ génératrices Diesel.
- ❖ modules photovoltaïques, entre eux.

L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur. [16]

C) Systèmes connectés au Réseau:

- ❖ Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie.
- ❖ Toute la génération est livrée directement au réseau électrique.
- ❖ Les systèmes éoliens liés au réseau nécessitent un convertisseur statique.

I-5-5 Architecture d'une éolienne: [17]

La conception d'une éolienne est réalisée par l'assemblage de trois corps constituant une machine et sont:

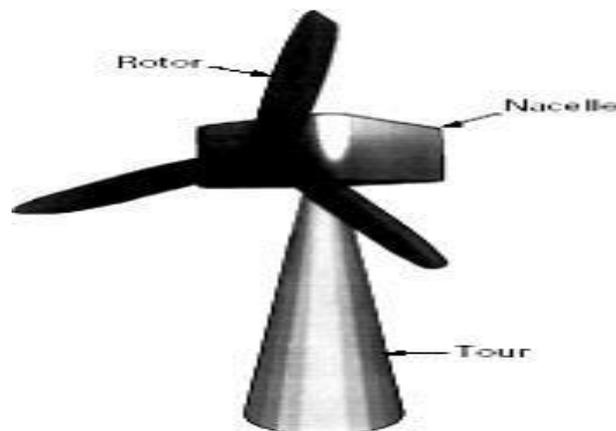


Figure I-15: Composants d'une éolienne.

A) Rotor :

C'est l'élément qui a pour but de capter l'énergie du vent et qui la transforme en énergie mécanique. Le rotor est constitué d'un nombre variable de pales qui sont montées sur l'arbre primaire par l'intermédiaire d'un moyeu.

Actuellement les turbines sont souvent à 3 pales, avec un contrôle à calage variable (pitch control). Les pales sont fabriquées en matériaux composites.

B) Nacelle :

C'est l'abri où loge le mécanisme de génération de l'énergie électrique. C'est un couvercle permettant de protéger les pièces mécaniques et électromécaniques des conditions atmosphériques.

C) Tour :

C'est le support qui porte l'ensemble formé du rotor et de la nacelle, et qui permet d'éviter tout contact entre les pales et le sol, et permet aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante pour le préserver du gradient du vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie.

I-5-6 Caractéristiques des éoliennes :

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes :

- Eolienne à axe horizontal.
- Eolienne à axe vertical.

I-5-6-1 Eolienne à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent (Fig-15). Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.



Figure I-16: Eoliennes à axes horizontaux.

On peut distinguer des éoliennes dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « hélice au vent » (Fig-16-a), et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « hélice sous le vent » (Fig-16-b).

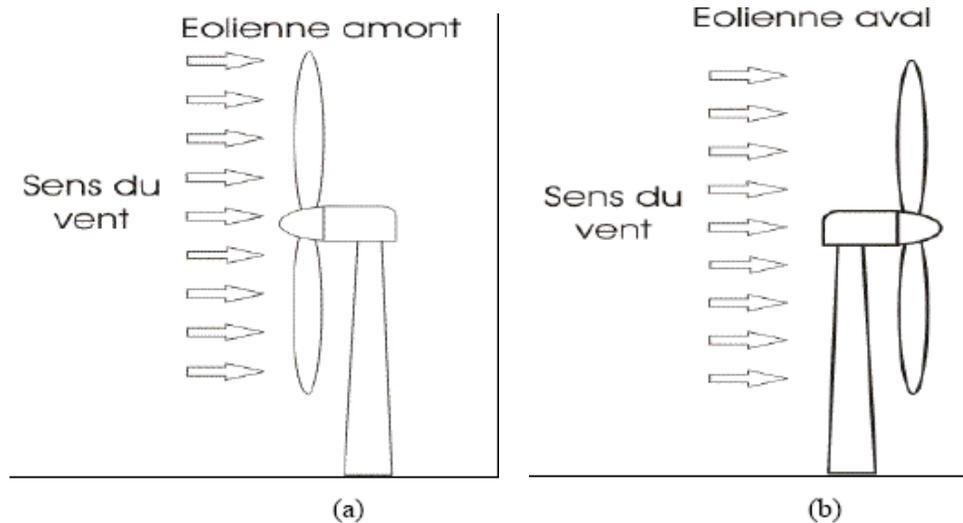


Figure I-17: Eolienne amont et aval.

I-5-6-2 Eolienne à axe vertical :

Elles présentent certains avantages : machineries au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, construction souvent simple. Elles tournent à faible vitesse et sont de ce fait peu bruyantes. Elles présentent par contre des difficultés pour leur guidage mécanique, le palier bas devant supporter le poids de l'ensemble de la turbine.

Il existe principalement trois technologies de ce type d'éoliennes (Fig-17) :

- Turbines Darrieus classiques,
- Turbines Darrieus à pales droites (type -H),
- Turbines Savonius.



Figure I-18: Eoliennes à axes vertical.

I-5-7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :**Avantage :**

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂.
- ✓ L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- ✓ Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.

Inconvénients :

- ☒ Nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- ☒ Coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- ☒ Bruit: IL a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs.

I-6 Générateur Diesel :**I-6-1 Description d'un Générateur Diesel :**

Dans le cas des installations autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un SEH (système énergie hybride), le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone. La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse sur le moteur diesel. Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux du carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constant. [10]

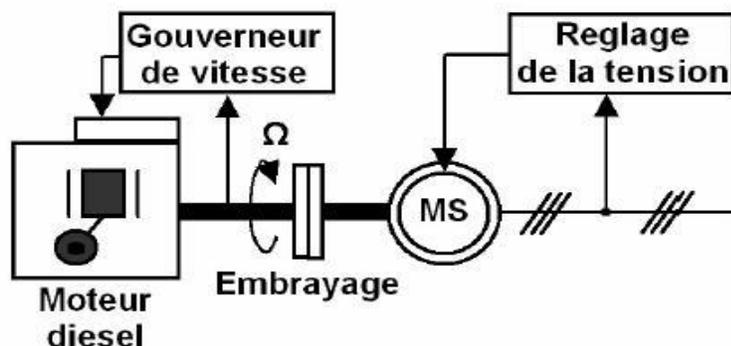


Figure I-19: Configuration de générateur diesel.

I-6-1-1 Réserve tournante :

La réserve tournante est définie en [18] comme étant l'exigence du système de commande définie par la capacité du générateur classique de couvrir les changements immédiats causés par l'arrêt des générateurs d'énergie renouvelable et par l'augmentation soudaine de la charge. En effet, la réserve tournante détermine la capacité instantanée de réserve minimale du GD en fonction des prévisions de la production d'énergie renouvelable et de l'évolution de la charge. Une réserve d'énergie doit être toujours disponible pour éviter l'effondrement du système lors d'une réduction soudaine de la production d'énergie renouvelable.

I-6-1-2 Temps de fonctionnement minimal :

Cette stratégie consiste à maintenir le GD en fonctionnement pour une durée minimale prédéfinie en fonction de la variabilité de la charge ou de la variabilité de l'énergie renouvelable. Celle-ci est utilisée pour réduire le nombre de démarrages /arrêts quand la puissance nette (la différence entre la puissance consommée par la charge et la puissance renouvelable) varie beaucoup. La minimisation du nombre de démarrages/arrêts du GD peut permettre d'éviter l'usure des moteurs diesels et leur démarreurs et en même temps réduire la consommation de carburant. [10]

I-6-1-3 Hystérésis :

Cette stratégie est souvent utilisée pour commander la déconnexion du générateur diesel. Le GD est arrêté seulement si la puissance renouvelable est supérieure à la demande de la charge. Ce surplus minimale d'énergie (ou hystérésis) peut être mesuré à partir de la variation de fréquence du réseau quand cette fréquence est fixée par la GD utilisant un régulateur type proportionnel (p) et à partir de son niveau de charge quand il utilise un régulateur type proportionnel-Intégral (pi).

I-7 Conclusion:

Ce chapitre présente d'une part les différentes notions qui entrent dans la conception des énergies. Et d'autre part, la présentation de tous les éléments constitutifs des systèmes (Photovoltaïques, éoliens et diesel). Ainsi que leurs principes de fonctionnements. Le chapitre suivant traitera la présentation du système hybride.

Chapitre II

Etat de l'art sur le système d'énergie hybride

II-1 Introduction:

Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées mais la présence du générateur diesel dans ce type de système hybride autonome suscite certaines discussions quant aux notions de « propreté » et de durabilité. [19]

II-2 Définition:

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride (SH). Un système hybride à source d'énergie renouvelable (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage. D'un point de vue plus global, le système énergétique d'un pays donné peut être considéré comme un système hybride. [20]

II-3 Le but du système hybride :

Le but du système hybride est d'assurer une alimentation à la charge sans interruption, et la possible de maximiser le bilan d'énergie provenant des sources d'énergies renouvelables.

Dans tous les cas, la bonne qualité de l'énergie doit être garantie par rapport aux normes de sécurités des personnes et d'usage des équipements.

Le champ d'application des SEH est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance. [21]

Puissance du SEH [KW]	Application
Faible : <5	Système autonome : station de télécommunication, pompage de l'eau,.....
Moyenne : 10-250	Micro réseau isolés : alimentation d'un village
Grande : >500	Grand réseaux isolés (ex : réseaux insulaire)

Tableau II-1 : Classification des SEH par gamme de puissance.

II-4 Classification:

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentes les classifications les plus répandues.

II-4-1 Le régime du fonctionnement :

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc. [22]

II-4-2 La structure du système hybride :

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière.

Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc....

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc.

Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la Figure II-1. [22]

II-5 Etudes des systèmes hybrides:

Au vu de ces nombreux critères, il est aisé d'imaginer la diversité des études sur les systèmes hybrides disponibles. Une synthèse non exhaustive des études réalisées sur ces systèmes est présentée dans ce paragraphe.

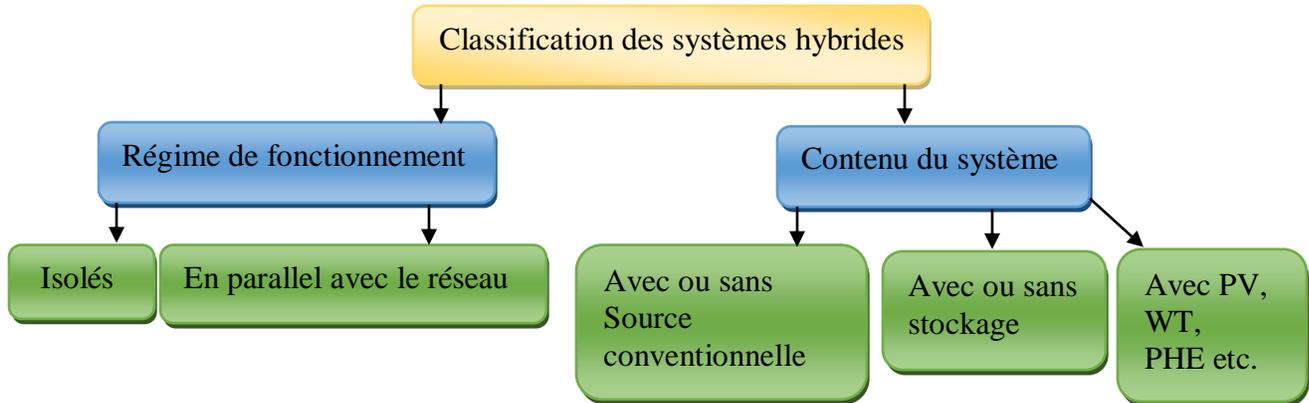


Figure II-1: Classification des systèmes hybrides.

II-6 Configuration de bus dans les systèmes hybrides :

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations. Ces configurations constituées par des sources d'énergies renouvelables, des batteries et des générateurs diesels se résument en trois types : Architecture à Bus CC (bus à courant continu) et architecture à Bus CC-CA (la connexion mixte, bus à CA et bus à CC). Nous présenterons ci-après, une description ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque configuration.

II-6-1 Architecture à bus à CC :

Cette technologie est née du besoin de coupler des consommateurs CA (plage de puissance moyenne) avec des générateurs CC et, de plus, de charger la batterie du côté CC par le biais d'un groupe électrogène. Ces configurations d'installation servent à l'alimentation de consommateurs éloignés (par ex. petites entreprises ou fermes). La plage de puissance globale est située entre 1 et 5 kW, la tension CC allant de 12 à 48 V. [18]

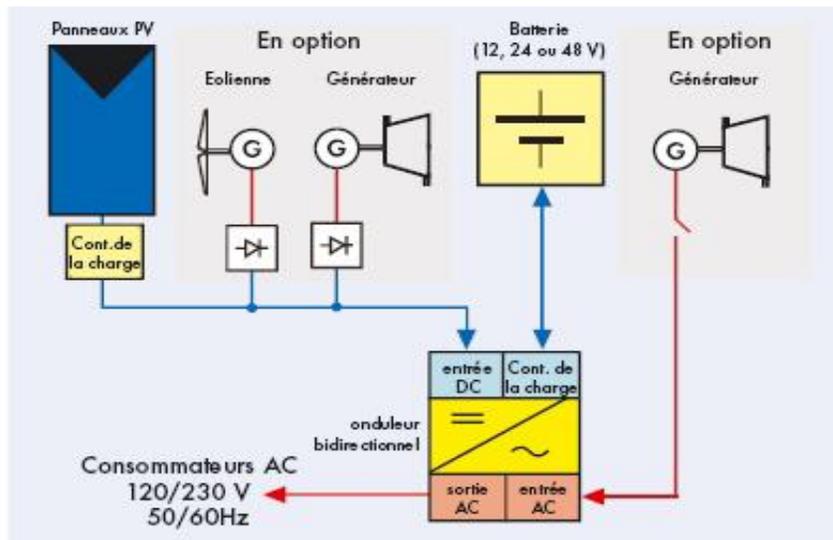


Figure II-2: Petits systèmes de puissance CA avec composants couplés du côté CC.

Dans le système hybride présenté dans la figure II-2, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. Le ou les générateur(s) diesel(s) sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges à CA. Les générateurs diesels ne peuvent donc pas alimenter les charges à CA directement. L'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge, alors que le générateur diesel est dimensionné pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps. La puissance délivrée peut être contrôlée par la commande du courant d'excitation de la partie électrique du générateur diesel ou en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable.

Les avantages et les désavantages d'un tel système sont présentés ci-après.

Avantage:

- ✓ La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- ✓ Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75-85 %.

Inconvénients:

- ☒ Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- ☒ Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

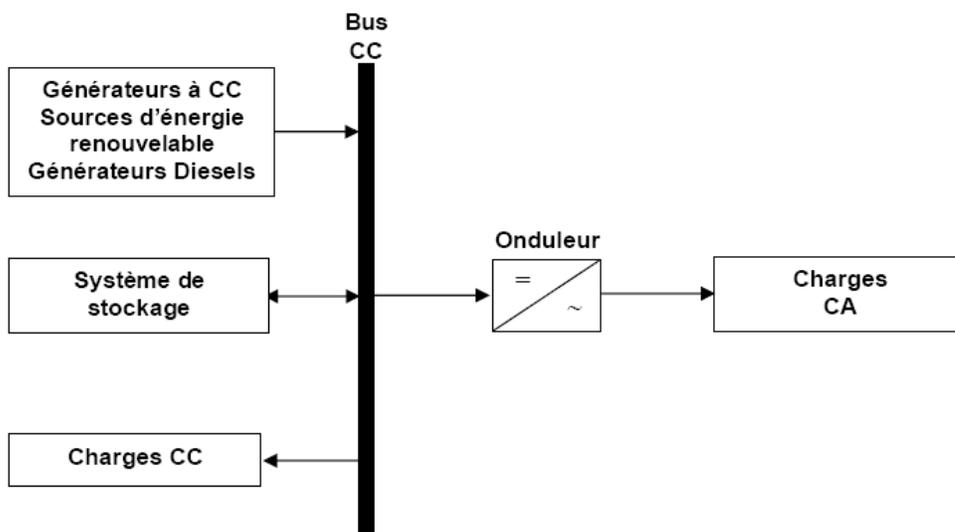


Figure II-3 : Configuration du SEH à bus CC.

II-6-2 Architecture mixte à bus à CC/CA :

La configuration à deux bus, à CC et à CA, est présentée dans la figure II-4. Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure (un couplage CC). Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur. Le ou les générateur(s) diesel(s) et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui, en fonctionnement normal, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur), Quand il y a un surplus d'énergie de la part du générateur diesel, il peut aussi charger les batteries (fonctionner en redresseur). L'onduleur bidirectionnel peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel est surchargé. [19]

Pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC, avec des batteries de stockage, est très répandue.

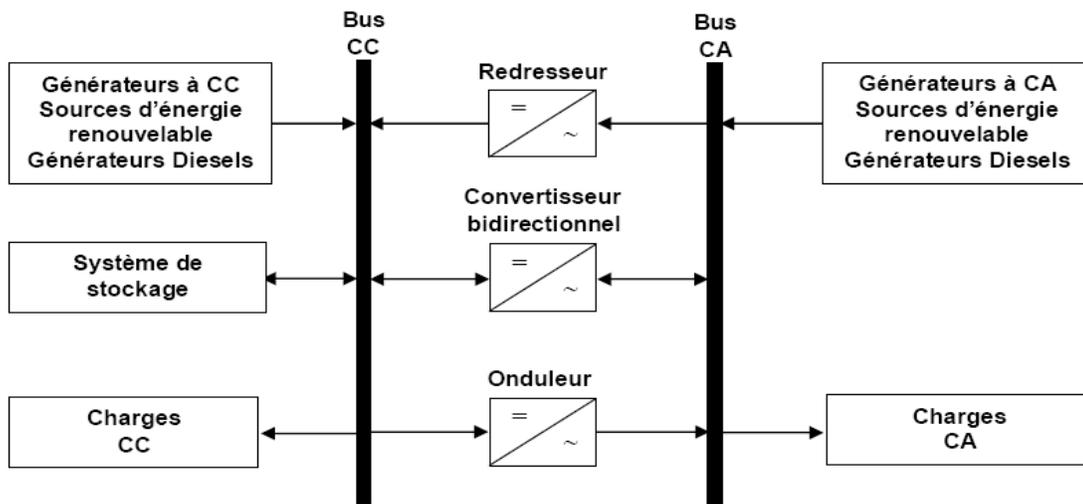


Figure II-4 : Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA.

Avantage:

- ✓ Le GD et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.
- ✓ La possibilité de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

Inconvénients:

- ☒ La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions en sortie du GD).

II-7 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH:

Les systèmes d'énergie en site isolé rencontrent en général les mêmes problèmes que les réseaux faibles [23]. Ces difficultés, qui ne se présentent pas dans les grands réseaux interconnectés, sont en général causées par:

- Les variations de l'énergie d'origine renouvelable (indépendamment de la charge) ;
- Le manque de connaissances dans le domaine de la qualité de l'énergie en réseau faible.

Compte tenu de la nature stochastique des sources d'énergie renouvelable, la difficulté principale des SEH comportant ce type de sources est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge.

Le moyen le plus simple d'éviter une augmentation du risque de ne pas satisfaire complètement la charge est de faire fonctionner les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels en parallèle, de façon continue (le générateur diesel fonctionne sans arrêt) [24]. Dans ce type de fonctionnement, les sources d'énergie renouvelable agissent comme une charge négative, en réduisant la charge moyenne des générateurs diesels. Ces derniers peuvent fonctionner à une puissance très basse mais l'économie de carburant est modeste à cause du rendement très faible (en fonctionnement à vide, la consommation de carburant s'estime à 25-30 % de la consommation à pleine charge) [25]. Ainsi, garder un moteur diesel au régime de ralenti pour une demande de puissance nulle suppose une consommation de carburant non négligeable.

Si l'énergie renouvelable est suffisante pour alimenter la plupart de la charge, la quantité de carburant économisée peut alors être augmentée en faisant fonctionner les générateurs diesels par intermittence. En fonctionnement intermittent, les générateurs diesels démarrent et s'arrêtent en fonction de la variation de l'énergie renouvelable et de la charge. Le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels peut, par conséquent, être très élevé. Le problème dans ce cas est l'usure prématurée des GD et de leurs démarreurs. Un autre problème devant être pris en compte quand le générateur diesel fonctionne par intermittence est le temps nécessaire pour le démarrage et l'arrêt. Le système peut, par exemple, s'effondrer subitement pendant le démarrage du générateur diesel, si l'énergie renouvelable diminue plus vite que le temps nécessaire pour la phase de démarrage. Il arrive parfois que la production d'énergie renouvelable soit plus importante que la consommation de la

charge. Si l'excès d'énergie dans le réseau ne peut pas être éliminé, la production d'énergie renouvelable doit alors être limitée ou même arrêtée. En général, les systèmes sans stockage utilisent une charge de délestage pour maintenir l'équilibre énergétique et la stabilité de la fréquence.

D'autres applications nécessitent des systèmes de commande supplémentaires pour maintenir la qualité de la tension. Tous ces dispositifs, tels que les charges de délestage et les systèmes de commande, augmentent le coût d'investissement qui peut ne pas être justifié par les avantages du système hybride. Seule une stratégie de commande adéquate peut permettre d'intégrer de manière optimale différents composants et donc de rendre le système rentable.

Les générateurs asynchrones, largement utilisés dans les éoliennes, ont besoin d'une quantité importante de puissance réactive, surtout pendant la phase d'excitation (démarrage). S'il n'y a pas assez de sources de puissance réactive dans les SEH et une ou plusieurs éoliennes démarrent, l'augmentation soudaine de la consommation de puissance réactive provoque des creux de tension et le système décroche. D'autres sources de perturbation pouvant générer des creux de tension sont les courts circuits. Ceux-ci peuvent provoquer l'effondrement des SEH, mais aussi une phase de ré-excitation des générateurs asynchrones connectés au système.

Une autre perturbation qui peut poser des problèmes est la surtension. Une surtension peut être causée par un court circuit, l'arrêt d'une charge importante ou la connexion d'un banc de condensateurs. Un inconvénient majeur dans un SEH connecté en réseau triphasé isolé est le déséquilibre de tension entre les phases. Un récepteur électrique triphasé déséquilibré ou des récepteurs monophasés déséquilibrés alimentés par un réseau isolé triphasé peuvent conduire à des déséquilibres de tension. Ces déséquilibres provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements supplémentaires dans les machines tournantes à CA.

Du point de vue de la continuité de la production et de la qualité de l'énergie, les facteurs pouvant affecter le fonctionnement d'un SEH sont résumés ci-après :

- Les variations de la charge à long terme : les régions isolées avec des petits réseaux électriques peuvent subir des changements rapides dans leurs besoins en électricité (généralement, la demande augmente).
- Les variations de la charge à court terme: en général, la demande en électricité varie beaucoup sur des intervalles de temps assez courts, de l'ordre de quelques minutes. Des valeurs minimales sont suivies par des pics.
- Les ressources d'énergie renouvelable : les ressources, comme le vent et le soleil, sont stochastiques par leur nature, ont des caractéristiques locales et sont très difficiles à prédire.

- Les perturbations du réseau : les défauts, tels que les courts-circuits, peuvent non seulement arrêter les systèmes, mais aussi, au pire des cas, détruire certains composants.

Dans un cas général, le synoptique d'échange de l'énergie dans un système de production hybride éolien- photovoltaïque, avec possibilité d'alimentation de Charges AC ou même une éventuelle connexion réseau, est tel que représenté sur la figure (II-5);

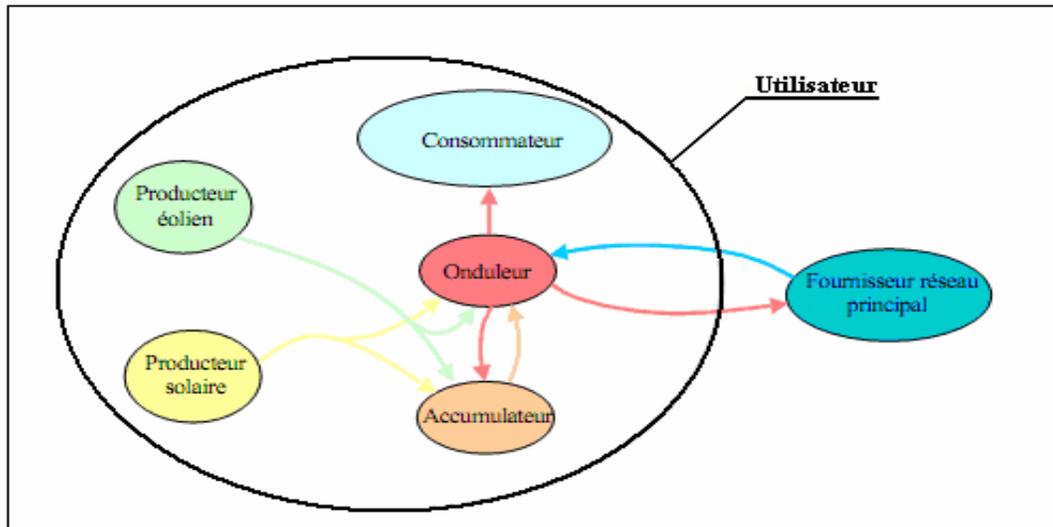


Figure II-5: Synoptique des échanges d'énergie dans un système multi-sources.

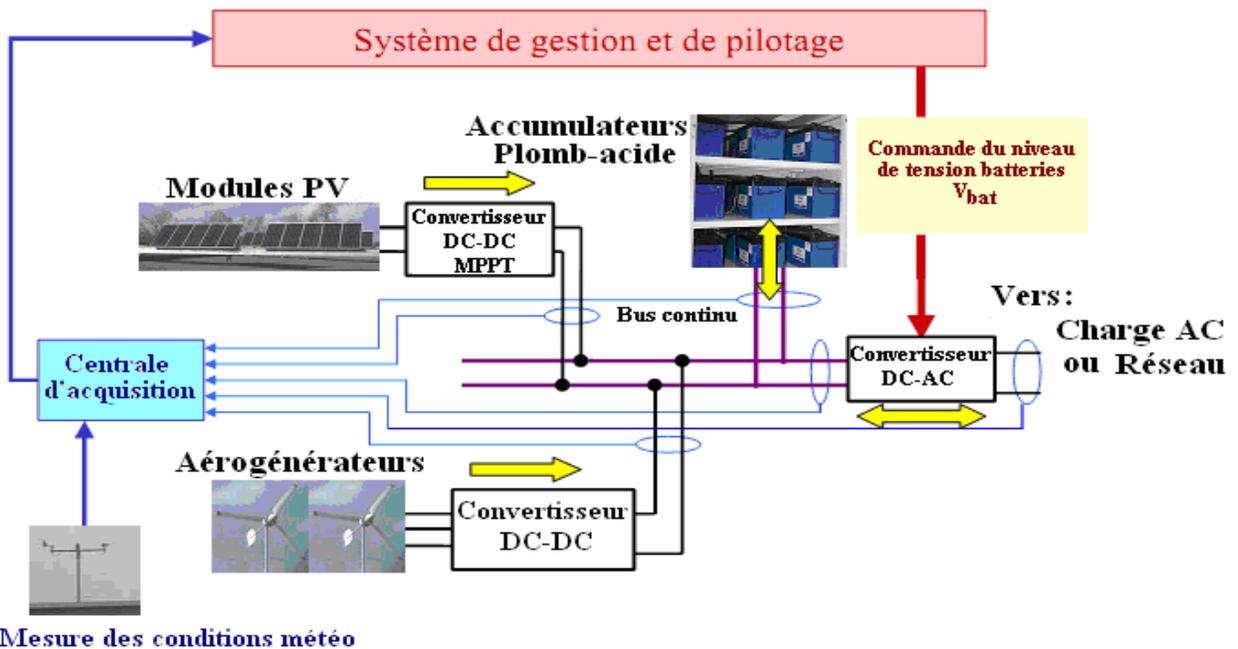


Figure II-6: Synoptique d'une installation expérimentale - Système de production hybride éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un stockage de l'énergie.

Le système est largement instrumenté, des capteurs permettent d'obtenir les ; [11]

❖ Conditions météo :

- Vitesse du vent ;
- Direction du vent ;
- Ensoleillement dans le plan horizontal ;
- Température ambiante ;
- Ensoleillement dans le plan des panneaux ;
- Température des panneaux.

Des capteurs nous permettent de mesurer les courants, tensions et puissances des :

- Chaînes de production éolienne ;
- Chaîne de production photovoltaïque ;
- Batterie ;
- Bus continu ;
- Réseau, en cas de connexion.

Ces données seront ensuite envoyées vers un système de gestion et de pilotage qui permet de commander le niveau de tension de la batterie. Avec une telle structure, nous pouvons contrôler les transferts d'énergie en intervenant sur le niveau de la tension batterie. Des systèmes de sécurité (contacteurs) permettent de court-circuiter les éoliennes et les panneaux photovoltaïques si le niveau de tension batterie devient trop important. Toutes les données des capteurs sont stockées pour permettre l'affichage et l'analyse des grandeurs caractéristiques du dispositif.

Les éléments de ce schéma seront détaillés au fur et à mesure de l'avancement de l'étude.

II-8 Descriptions des composantes du système hybride:

II-8-1 Générateurs photovoltaïques:

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base par des cellules photovoltaïques. Elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire. Elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit. La cellule photovoltaïque est donc un moyen sûr et écologique de produire de l'énergie.

II-8-2 Générateur éolien:

Un système éolien ou un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique.

La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines.

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire [5].

II-8-3 Générateur diesel:

Dans le cas des installations à sources d'énergie renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone (**Figure II-7**). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse (régulateur de vitesse) sur le moteur diesel [26].

Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

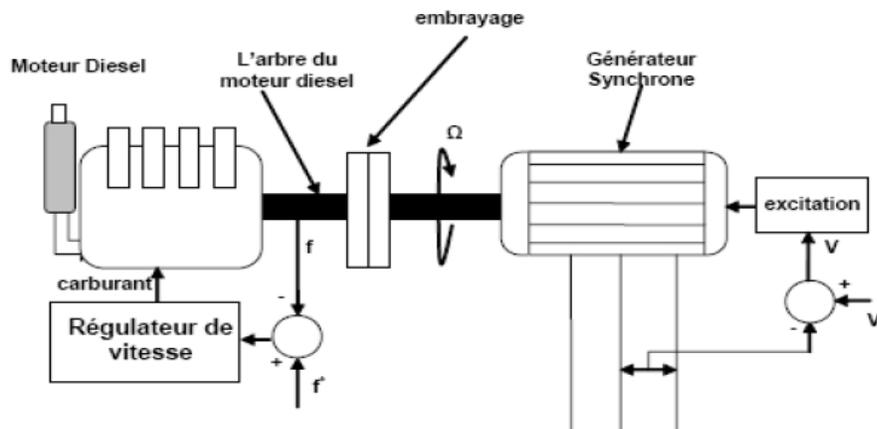


Figure II-7: Configuration du générateur diesel.

Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive. Quand plusieurs générateurs diesels fournissent de l'énergie au réseau, ceux-ci sont connectés généralement à un bus à CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels.

II-8-4 Les Systèmes de stockage :**II-8-4-1 Les Batteries:**

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides afin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés, dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [23].

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb acide. Les batteries nickel cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène.

II-8-4-2 Les piles à combustible : [20]

L'intérêt accru dans le monde entier à la technologie PC rend relativement énormes, centrales, fixes de 200W à 2 MW. Ces piles sont disponibles dans le commerce, avec des rendements allant de 30 à 50%.

La pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie statique électrochimique qui produit un courant continu à travers la réaction d'hydrogène et de l'oxygène en présence d'un électrolyte, une électrode positive (cathode) et une électrode négative (anode). L'électrolyte porte des charges électriques par une électrode à l'autre. Un catalyseur est habituellement exploité pour accélérer la réaction aux électrodes. Il existe plusieurs types de piles à combustible, le plus souvent classés selon le type d'électrolyte sont résumées dans le tableau II-2.

Acronyme	Nom	Temperature de fonctionnement	Electrolyte
PEMFC	Polymere Electrolyte Membrane Fuel Cell	50-80°C	Polymère
HT-PEMFC	High Temperature PEMFC	120-180°C	Polymère
DMFC	Direct Methanol Fuel cell	25-50°C	Polymère
DCFC	Direct Ethanol Fuel Cell	25-50°C	Polymère
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	700-1000°C	Céramique
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	650°C	Liquide
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	150-200°C	Liquide
AFC	Alkaline Fuel Cell	60-120°C	Liquide

Tableau II-2: Les différents types de PC.

II-8-5 Système de supervision:

La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système. Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants.

Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de démarrage et d'arrêt des générateurs diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges.

II-8-6 Convertisseurs:

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu (CC) en à courant alternatif (CA) et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

- Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement ils sont généralement monophasés ou triphasés.
- 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.
- Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC pour adapter la tension entre deux sources.

II-8-7 Charges:

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

II-9 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les systèmes de production d'énergie hybride. Nous avons présenté la définition et les différentes configurations des systèmes hybrides (bus à CC et CC/AC) avec les avantages et les inconvénients. En fin, nous avons parlé sur les principaux composants des systèmes hybrides. Le chapitre suivant traitera l'évaluation des gisements relatifs au PV/Eolien.

Chapitre III

Evaluation des gisements relatifs au PV/Eolien

III-1 Introduction:

Le gisement solaire/éolien est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire/vitesse du vent, disponibles dans un site donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale, et de la vitesse du vent. Pour effectuer le dimensionnement le plus exact possible, compte tenu des demandes en énergie à satisfaire, l'étude du gisement est le point de départ de toute investigation, cette dernière passe bien évidemment par une incontestable assimilation de la terminologie. Celle liée au gisement solaire notamment au rayonnement.

III-2 Rayonnement solaire:

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1354 w/m^2 (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus (**Figure III-1**) L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.... [27]

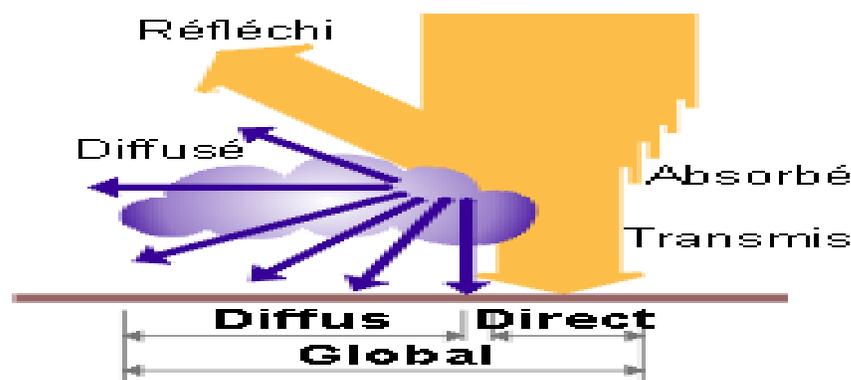


Figure III-1 : Les composants du rayonnement solaire.

III-2-1 Ses composantes:

Traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit des modifications quantitatives et qualitatives. Le spectre du rayonnement au niveau du sol n'est donc pas identique à celui du rayonnement extraterrestre. Abordant l'atmosphère, le rayonnement incident s'affaiblit suite

l'absorption partielle par les gaz atmosphériques, la vapeur d'eau et les aérosols ainsi qu'à la diffusion moléculaire. On distingue trois composantes :

- **Le rayonnement direct:** Les rayons du soleil atteignent le sol terrestre sans subir de modification de leur trajectoire initiale. Les rayons restent parallèles. [6]
- **Le rayonnement diffus:** est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.
- **Le rayonnement réfléchi:** c'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante (par exemple, la neige en montagne). Cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée. [28]
- **Le rayonnement global:** qui est la somme du rayonnement direct et diffus. Nous exposons dans ce qui suit les expressions et les principales caractéristiques des deux composantes du rayonnement global.

III-2-2 Le nombre d'air mass:

Vu les différentes couches atmosphériques existantes, la valeur de l'éclairement reçu sur terre est différente de celle émise par le soleil. Cette valeur dépend de l'épaisseur d'air traversée et donc de la hauteur du soleil.

La valeur de cet éclairement est souvent exprimée en termes d'AMX qui désigne le nombre d'air-masse ou masse atmosphérique. L'éclairement reçu au dessus de l'atmosphère est désigné par le spectre AMO (correspond à une puissance de $1400\text{W}/\text{m}^2$), par contre celui reçu au niveau de la mer, par temps clair, et pour un rayonnement normal (soleil au zénith) correspond à air-masse 1, il est de l'ordre de $1000\text{W}/\text{m}^2$ à $1200\text{W}/\text{m}^2$.

III-2-3 Unités utilisées:

A) L'éclairement (ou irradiance): est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en $[\text{W}/\text{m}^2]$. Le S.I. recommande d'utiliser ***E*** (ou ***Es***) comme symbole, ***G*** est le plus communément utilisé dans la littérature ;

B) L'irradiation (ou rayonnement): est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en $[\text{J}\cdot\text{m}^{-2}]$. L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le symbole ***H***. D'autres unités plus courantes sont le $[\text{Wh}/\text{m}^2]$ bien que ce dernier ne doit pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système SI.

III-2-4 Instruments de mesure:

Les scientifiques, en particulier les climatologues, élaborent des modèles pour décrire et prédire les phénomènes atmosphériques, reste que le moyen le plus sûr pour disposer de données fiables demeure encore le recours aux statistiques accumulées sur les années antérieures, grâce à des instruments de mesure. Certes, le climat évolue et il faut en tenir compte, mais relativement lentement par rapport aux marges de sécurité.

En ce qui relève de la mesure du rayonnement ;

Les capteurs des appareils de mesure du rayonnement peuvent être classés comme :

- Des capteurs thermiques : ils absorbent les radiations qu'ils reçoivent et les dégradent en énergie thermique qui sera convertie sous une forme qui permet sa mesure.
- Des capteurs quantiques qui utilisent les quantas d'énergie radiative qu'ils absorbent, pour libérer des électrons qui produisent un courant électrique. Au niveau des détecteurs, cet effet pouvant se traduire par l'apparition d'une tension (détecteur photovoltaïque), une variation du taux d'émission des électrons par une surface (détecteur photoémetteur) ou par le changement de conductivité du détecteur (détecteur photoconducteur). [11]

On distingue entre autres:

A) L'héliographe: qui est l'instrument dont l'origine est la plus ancienne. Il donne la durée d'insolation ou plus exactement la période du jour pendant laquelle le rayonnement solaire a dépassé un certain seuil. C'est sur un papier qui se déplace que le rayonnement solaire, concentré à l'aide de dispositif optique, laisse son empreinte en le brûlant sur une longueur qui donne la durée du jour. Cet appareil n'est pas très intéressant pour le photovoltaïque, car ne renseigne pas sur l'intensité du rayonnement.

B) Le pyranomètre: est l'appareil le plus utile puisqu'il évalue, à l'aide d'une thermopile, l'ensemble du rayonnement solaire (direct+diffus) sur une surface donnée et sur un large spectre de 0.3 à 3 [μm] de longueur d'onde. Son globe de verre lui confère une grande acceptante angulaire, proche de la demi-sphère (il collecte les rayons venant de toutes les directions, même les rayons rasants).

Il peut également mesurer que la part diffuse du rayonnement, on masque alors le rayonnement direct avec un cache en forme d'arceau qui suit la trajectoire du soleil pour éliminer la contribution directe du rayonnement.

C) Le pyréliomètre: quant à lui, ne mesure que le rayonnement direct. Egalement équipé par un système suiveur du soleil, il est muni d'un tube de visée à faible ouverture avec un détecteur placé au fond.

Grâce aux appareils décrits ci-dessus placés dans différentes orientations, les stations météo élaborent des statistiques de rayonnement solaire à partir des milliards de données collectées. Des bases de données sont ainsi constituées, avec d'autres informations fortes utiles telles que les températures minimales et maximales, et le taux d'humidité.

La figure- (III-2) suivante représente un pyranomètre ;

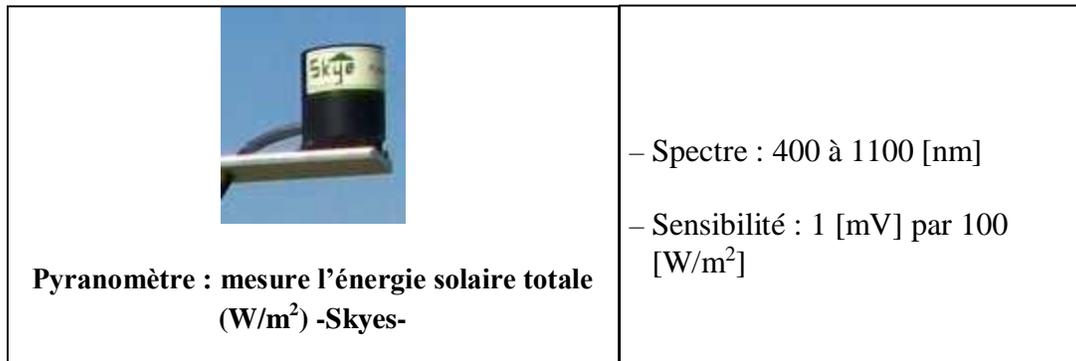


Figure III-2: Pyranomètre doté de ses caractéristiques.

Eu égard à la superficie du territoire algérien (2 500 000 [km²]) le réseau de mesure de paramètres radiométriques est peu dense. En effet, sur les 54 stations qui mesurent la durée d'insolation, seules sept assurent la mesure des composantes globale et diffuse du rayonnement solaire reçu sur plan horizontal. Ainsi, des modèles ou des techniques de reconstitution du rayonnement solaire à partir de la durée d'insolation ou autres paramètres météorologiques sont utilisés.

Pour les mesures relatives au vent, on sait que le vent est une grandeur vectorielle tridimensionnelle qui peut être caractérisée par deux grandeurs représentant son orientation (direction du vent) et son module (vitesse du vent). Chacune d'elles présente des variations aléatoires autour d'une valeur moyenne. La direction est mesurée à l'aide d'une girouette et la vitesse à l'aide d'un anémomètre.

Un anémomètre est un appareil permettant de mesurer la vitesse ou la pression du vent. Son nom vient du grec « anemos » signifiant vent.

Les anémomètres peuvent être divisés en deux classes :

- Ceux qui mesurent la vitesse;
- Ceux qui mesurent la pression du vent.

Cependant, il y a une relation étroite entre la vitesse et la pression. Ainsi, un appareil prévu pour une mesure fournira des informations sur les deux quantités. Le premier anémomètre a été inventé par Leone Battista Alberti au 14eme siècle. Ils existent en plusieurs sortes plus ou moins précises, à

coupelle, à hélice, à plaque, à ultra-son et à tube, la figure (III-3) ci-dessous donne la configuration d'un anémomètre à coupelle;

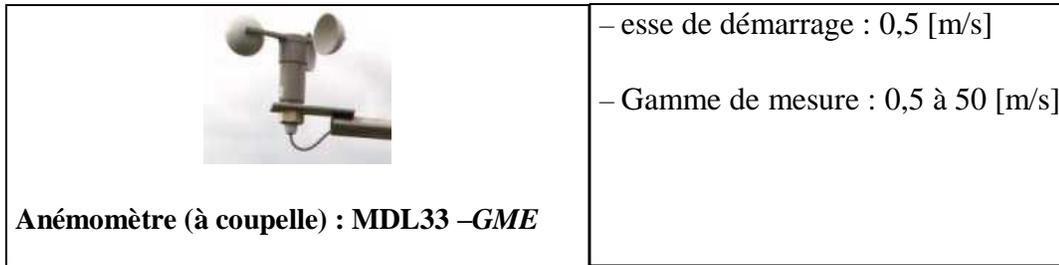


Figure III-3: Anémomètre à coupelle doté de ses caractéristiques.

Mais des kits de mesures hybrides éolien-solaire existent également. La figure (III-4) illustre un système hybride où est inséré l'appareil en question ;

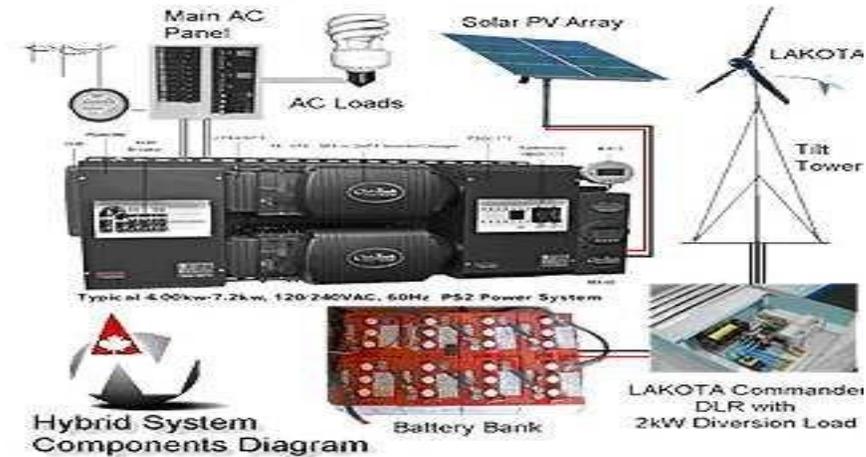


Figure III-4: Appareil de mesure hybride solaire-éolien. [29]

Pour récupérer d'autres chiffres, on pourra avoir recours aux bases de données d'ensoleillement accessibles sur des logiciels de dimensionnement comme Meteonorm 2000(version 4) et PVSyst, tous deux conçus en Suisse, ou bien sur la banque de données de MeteoSyn intégrée dans PVSOL, mais plus complète encore la base de données météorologique de la NASA, dont une partie est téléchargeable sur le logiciel canadien RETScreen.

III-3 Notions théoriques sur l'éolien:

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur d , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , (Fig III-5) s'écrit: [30]

$$dEc = \frac{1}{2} \rho S * dx * v^2 \tag{1}$$

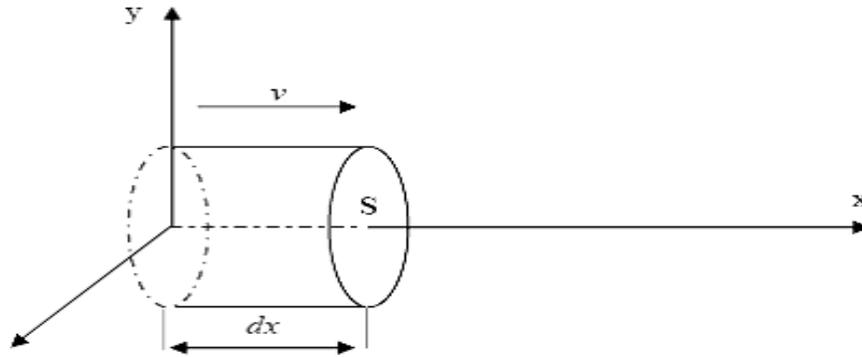


Figure III-5 : Colonne d'air animée d'une vitesse V .

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps. En supposant $dx = vdt$, on déduit l'expression de P_m :

$$p_m = \frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 v^3 \quad (2)$$

ρ : Densité volumique de l'air (Kg/m^3)

V : vitesse du vent (m/s)

Ec : Energie cinétique du vent (Joules).

III-3-1 Loi de Betz:[31]

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert BETZ en 1929, qui suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2 . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant.

Soit V' , la vitesse au travers de S , la section balayée par les pales de l'éolienne (Voire Fig III-6), et M la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation de l'énergie cinétique ΔEc est :

$$\Delta Ec = \frac{1}{2} * M * (V_1^2 - V_2^2) \quad (3)$$

La puissance aérodynamique de l'éolienne $Paer$ s'écrit alors :

$$Paer = \frac{1}{2} * \rho * s * V' * (V_1^2 - V_2^2) \quad (4)$$

Par ailleurs, la force de l'air (F) sur l'éolienne est donnée par:

$$F = \rho * s * V' * (V_1 - V_2) \quad (5)$$

D'où:

$$Paer = F * V' = \rho * s * V' * (V_1 - V_2) \quad (6)$$

En identifiant les équations (3) et (5), il vient :

$$V' = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (7)$$

Et donc:

$$Paer = \frac{1}{4} * p * s * (V_1^2 - V_2^2) * (V_1 + V_2) \quad (8)$$

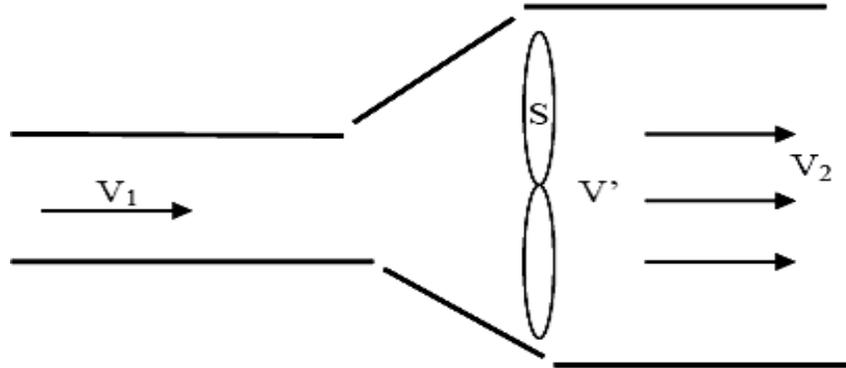


Figure III-6 : Théorie de Betz : Schéma de principe.

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivé $\frac{\partial Paer}{\partial V_2}$ est nulle, soit pour

$V_2 = \frac{V_1}{3}$, la puissance est maximale et vaut :

$$Paer = Paer_{Max} = Cp_{Max} * \frac{V_1^3 * p * s}{2} = \frac{16}{27} = \frac{V_1^3 * p * s}{2} \quad (9)$$

On peut donc en déduire que même si la forme des pales permet d'obtenir $V_2 = \frac{V_1}{3}$, on ne récupère au mieux que 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont, on écrira alors :

$$Paer = Cp * \frac{p * s * V_1^3}{2} \quad (10)$$

Où Cp est le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale 0.593). Ce coefficient dépend de la vitesse du vent en amont V_1 , du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage et de leur vitesse de rotation.

III-3-2 Vitesse spécifique ou normalisée:

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ΩR sur la vitesse instantanée de vent V (Fig III-7) et donné par l'expression suivante:

$$\lambda_n = \frac{R_t * \Omega_t}{V} \quad (11)$$

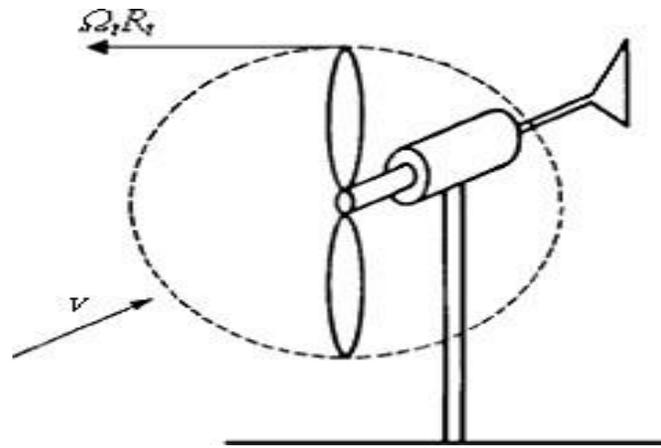


Figure III-7: Vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aube $\Omega t R_t$.

R_t : Rayon de la surface balayée (m)

V : Vitesse de vent (m/s)

Ωt : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s).

III-3-3 Coefficient de puissance:

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible.

$$C_p = \frac{pm}{pmt} = \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) + \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right)}{2} \quad (12)$$

Le coefficient C_p est variable, il est en fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine Ωt , et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique λ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de BETZ, est de $16/27$ soit 0.593 .

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de BETZ ; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique:

$$n = \frac{16}{27} * C_{pMax} \quad (13)$$

C_p max Étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p .

Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale Ωt_n .

III-3- 4 Coefficient de couple:

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle.

En combinant les équations (9) (10) (11), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par: [32]

$$p_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (14)$$

Avec :

$$\lambda_n = \frac{R_t * \Omega_t}{V}$$

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$T_t = \frac{p_m}{\Omega_t} = \frac{R_t * p_m}{\lambda v} = \frac{C_p}{\lambda} * \frac{1}{2} * \rho \pi R_t^3 V \quad (15)$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{2T_t}{\rho R_t S_t V^2} \quad (16)$$

T_t : Couple de la turbine éolienne (N.m).

III-3-5 Distribution de Weibull:

Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Weibull Sa densité de probabilité se présente sous la forme: [33]

$$f(v) = \left(\frac{K}{C}\right) * \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right) \quad (17)$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité (V) représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées. K et C sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre K (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que C détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier a la dimension d'une vitesse.

La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes.

La fonction de répartition est donnée par :

$$f(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(v)dv = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right) \tag{18}$$

$$f(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(v)dv = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right) \tag{19}$$

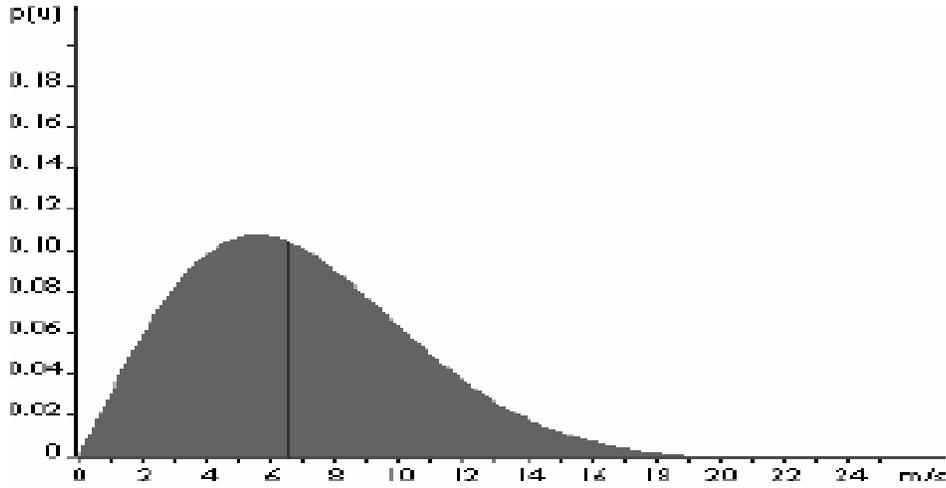


Figure III-8: Exemple de la distribution de Weibull. [34]

➤ **Autres applications relatives à la caractérisation éolienne:**

La rose des vents: Chaque site éolien est caractérisé par une direction de la vitesse de vent dominante. Cependant, elle est variable comme la valeur de la vitesse du vent. Pour décrire ces propriétés spatiotemporelles le diagramme appelé rose des vents peut être élaboré. Il se présente comme un diagramme polaire, lequel répertorie l'énergie du vent disponible dans chaque direction en pourcent (parfois c'est la vitesse) et le temps de l'occurrence de chaque direction du vent en pourcent. L'exemple est donné par la figure (III-9);

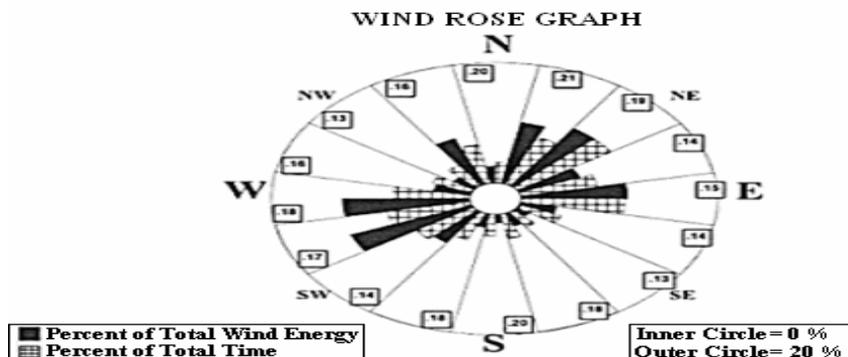


Figure III-9: Exemple de la rose des vents.

La rose des vents permet d'avoir une première vue sur la capacité énergétique du site éolien mais elle est destinée plutôt à l'aide au choix de l'emplacement spatial de la turbine et principalement pour éviter les obstacles qui peuvent gêner le flux d'air. Des informations supplémentaires peuvent être insérées dans ce graphique comme la turbulence ou la rugosité du terrain.

III-4 Présentation du site :

III-4-1 L'emplacement du système hybride:

Pour cette étude, une localisation géographique est considérée : l'objectif de cette étude est de choisir un village dans une région de l'Algérie pour étudier la faisabilité de l'utilisation d'un système hybride de génération d'énergie.

Le site choisi se situe dans la région des hautes plaines steppiques au Sud-ouest algérien. Il s'agit de la commune d'El-kheiter (Wilaya d'EL BAYADH). Les coordonnées géographiques de notre localité sont: latitude ($34^{\circ} 9' 36''N$), longitude ($0^{\circ} 4' 24''Est$), L'altitude (1000m).

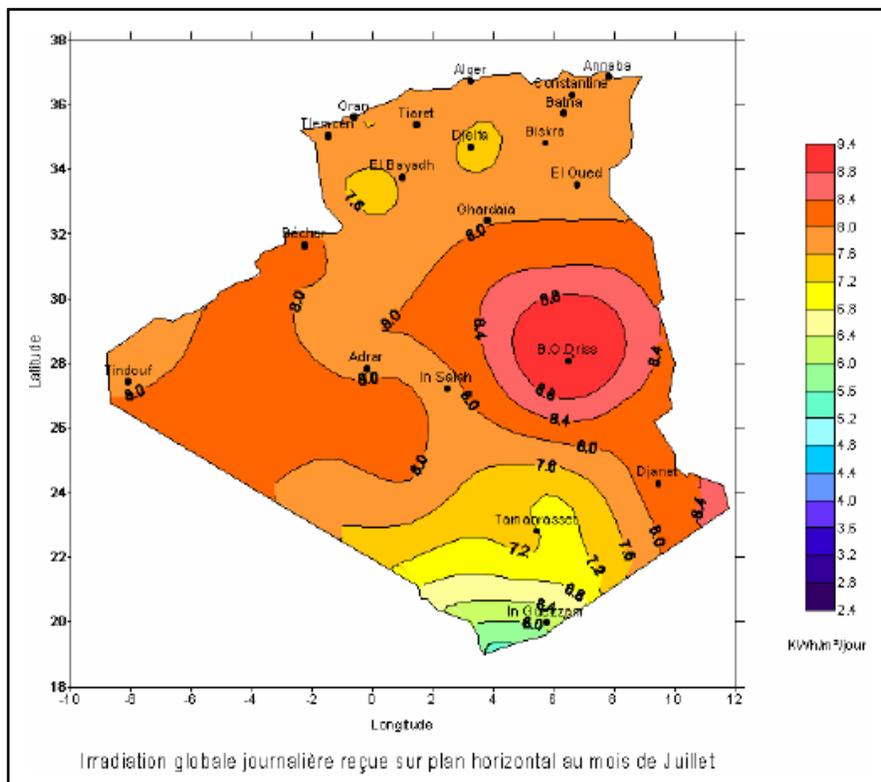


Figure III-10: Carte de l'irradiation journalière reçue sur une surface horizontale.

Cette carte permet de cibler les zones où mieux installer des panneaux solaires d'alimentation des régions isolées.

III- 4-2 Détails de la charge:

C'est une description de la demande d'électricité du site. Elle inclue l'éclairage, le chauffage et le fonctionnement des appareils électriques (réfrigération, ordinateurs, téléviseurs.....). Le site compte 80 habitations (480 personnes), avec une consommation estimée à 0.26 KWh/j, et par personne, ce qui donne une consommation journalière de 124.8 KWh/j, ce qui donne aussi une puissance moyenne journalière de 5.2 KW, qui n'est pas constante durant toute la journée.

La distribution journalière de cette charge est représentée par les diagrammes ci-dessous:

Heures	Charge [kw]	Heures	Charge [kw]
00:00 – 01:00	4.1	12:00 - 13:00	5.1
01:00 – 02:00	4.1	13:00 - 14:00	5.2
02:00 – 03:00	3.8	14:00 - 15:00	5.1
03:00 – 04:00	3.5	15:00 - 16:00	4.8
04:00 – 05:00	3.4	16:00 - 17:00	5.2
05:00 – 06:00	3.6	17:00 - 18:00	5.4
06:00 – 07:00	4.3	18:00 - 19:00	6.3
07:00 – 08:00	5.1	19:00 - 20:00	7.5
08:00 – 09:00	5	20:00 - 21:00	8
09:00 – 10:00	4.9	21:00 - 22:00	7.6
10:00 – 11:00	5.1	22:00 - 23:00	6.1
11:00 – 12:00	5.4	23:00 - 00:00	5.4

Tableau III-1 : Distribution journalière de la charge électrique.

Le profil de charge à alimenter en électricité est illustré dans la Figure III- 8. Il s'agit d'une charge avec valeur moyenne journalière de 124.8 KWh/j et un pic de puissance instantanée de 8 KW.

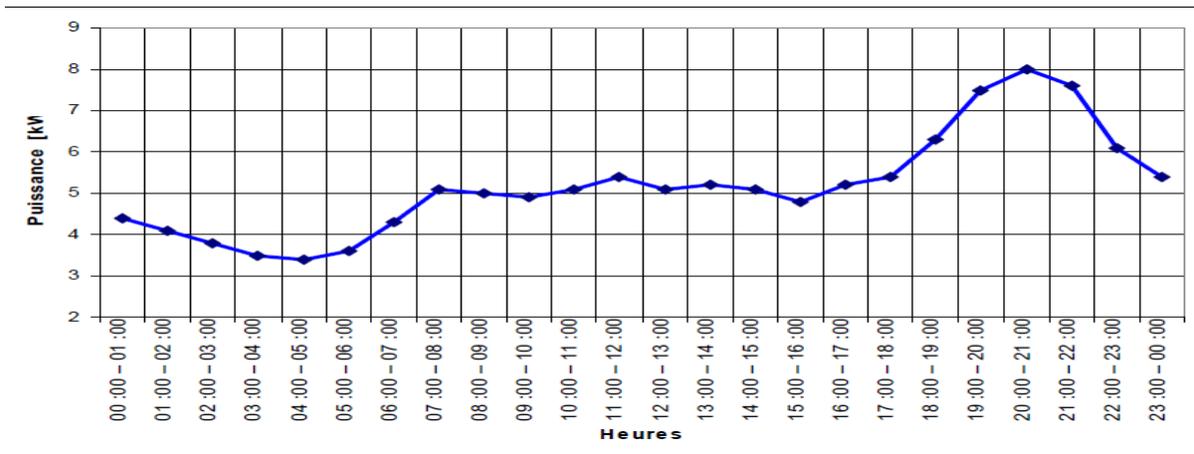


Figure III- 11 : Répartition journalière de la charge électrique.

On remarque que le profil de consommation a généralement la même tendance d'évolution journalière. Il y a un creux de consommation la nuit entre 0h et 7h un pic de consommation, le soir entre 20h et 21h. Ces informations restent très difficiles à exploiter car le profil de consommation est aussi variable selon les saisons.

III-4-3 Données météorologique:

Les données météorologiques enregistrées comportent en général, la durée d'ensoleillement, la température, l'humidité, la direction et la vitesse du vent, etc.....

III-4-3-1 Variation mensuelle de l'irradiation:

Les valeurs prélevées sur la station, tableau III-2 indiquent que les valeurs du rayonnement solaire mensuel extrêmes 7.32 en juillet et 2.42 KWh/m²/j en Décembre correspondent à une moyenne annuelle de 4.90 KWh/m²/j. Ce potentiel est assez important et il est pratiquement exploitable durant toute l'année. Les moyennes mensuelles journalières du rayonnement, dépassent 4.95 KWh/m²/j durant la période d'avril à septembre, mais moins d'éclairement énergétique solaire d'Octobre à mars.

Les données d'irradiation (H) et l'indice de clarté (Kt) sont illustrés dans le tableau (III-2).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy
Irradiation(H) KWh/m ² /j	2.7	3.67	4.68	5.76	6.61	7.29	7.32	6.41	5.09	3.90	2.88	2.42	4.90
Facteur (K j) D'éclairement	0.516	0.559	0.559	0.573	0.594	0.687	0.649	0.620	0.577	0.558	0.526	0.506	0.584

Tableau III-2: Potentiel solaire à El-Kheiter.

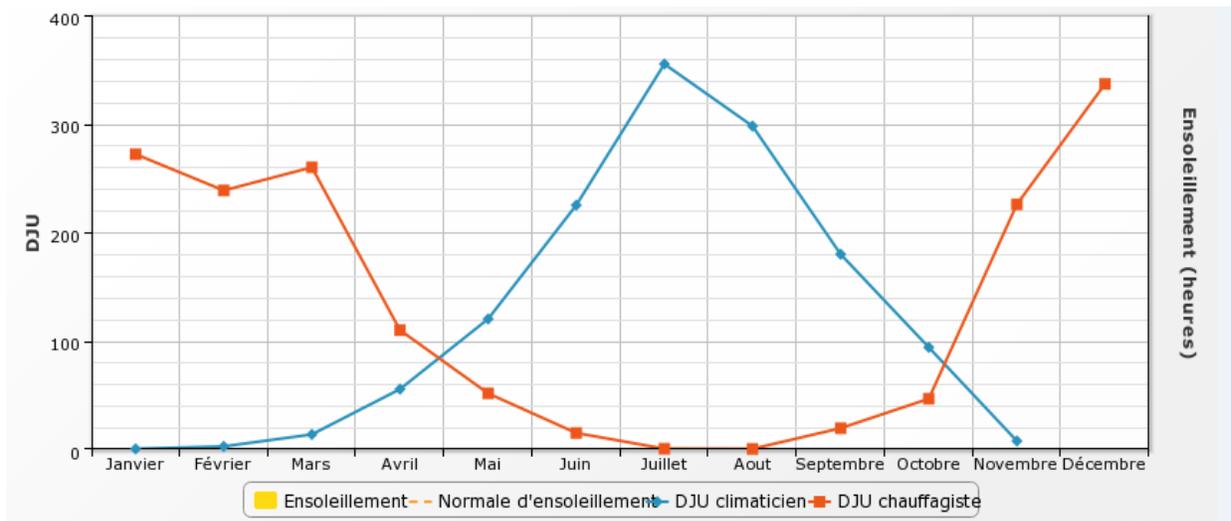


Figure III- 12 : L'ensoleillement mensuel moyen El-kheiter.

III-4-4 Données de la Vitesse du Vent:

III-4-4-1 Repartition Régionale de la Vitesse du Vent:

Pour installer une éolienne il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire; nous devons donc faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites. La figure ci-dessous montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d'Energie Eolienne du Centre de Recherche en Energies Renouvelables (CDER, Algérie). Nous devons faire des mesures de la vitesse du vent dans le site d'El-kheiter.

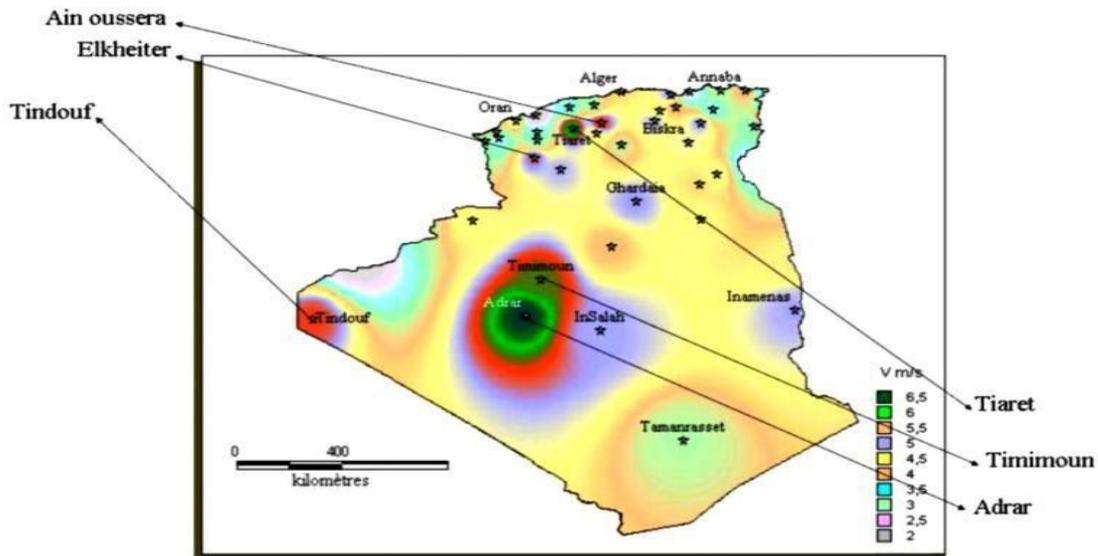


Figure III- 13 : Les régions ventées en Algérie.

III-4-4-2 Variation quotidienne et annuelle de la vitesse du vent:

Les moyennes mensuelles de pour le site d'El-kheiter, tableau III-3 indiquent que la vitesse du vent 4.89 au mois de Avril et 3.93 m/s en Septembre correspondent à une moyenne annuelle de 4.38 m/s. Il servira à confirmer l'évolution de la vitesse du vent en fonction des saisons.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy
Vent (m/s)	4.35	4.64	4.72	4.89	4.28	4.44	4.42	4.00	3.93	4.22	4.20	4.43	4.38

Tableau III-3: Moyennes mensuelles de la vitesse du vent à El-Kheiter.

III-4-5 Données de la température:

La région est caractérisée par une saison d'été très chaude de Mai à octobre et une température ambiante mensuelle moyenne qui dépasse les 17.27°C.

La température mensuelle maximale est de 28.95°C au mois de juillet, tandis que la température minimale est 6.81°C au mois de Janvier. Les données de la température ambiante du site considère sont illustrées dans le tableau (III-4).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy
Température (°C)	6.81	8.76	12.12	15.11	20.00	25.42	28.95	28.12	23.41	18.10	12.24	8.22	17.27

Tableau III-4 : Données des températures ambiantes El-kheiter.

III-5 Conclusion:

Dans cette partie, ont été données des explications générales sur le gisement solaire/éolien se basant sur les données du site de El-kheiter ont également été présentées. Le chapitre suivant traitera la présentation du logiciel HOMER.

Chapitre IV

Présentation du logiciel HOMER

IV-1 Introduction:

Les systèmes hybrides utilisent différentes sources d'énergies comme l'éolien et le générateur diesel. Ce type de système peut représenter une solution pour les régions éloignées d'un grand réseau interconnecté.

Cependant le dimensionnement et l'architecture de système de génération d'énergie est une étape primordial dans la conception et la réalisation de même système. Plusieurs études prennent le paramètre variable de la plupart des énergies renouvelables pour la réalisation d'un système de contrôle complexe. Dans la même tâche un contrôle de la tension et de la fréquence pour un système éolien-diesel. La modélisation étant aussi un facteur majeur pour des études élaborées afin de simuler un bon fonctionnement de système.

Plusieurs sont les logiciels qui nous permettent de la faire. Une modélisation d'un système hybride de génération d'énergie est présentée par le logiciel HOMER. Pour but d'améliorer la qualité de l'énergie produite par un système de production d'énergie électrique, un système hybride est proposé dans ce chapitre. Une application d'un système hybride est simulée sur le logiciel HOMER afin d'alimenter un site pour une optimisation qui permet de déterminer le type du système hybride réel a installé.

IV-2 Analyse du logiciel HOMER :

IV-2-1 Définition de logiciel HOMER :

HOMER (Hybrid Optimisation of Multiple Energy Ressources) est un logiciel de simulation et d'optimisation destiné à l'étude d'installations de production d'énergie multi sources (PV, éolien, réseau, stockage, diesel...). Il est principalement destiné à la simulation de mini-réseaux connectés ou non-connectés (« off-grid »). Il a été développé en premier lieu par le **National Renewable Energy Laboratory (NREL)** dépendant lui-même du ministère américain de l'énergie.

L'entreprise Homer Energy a été spécialement crée pour sa commercialisation et la suite de son développement. Il compte près de 100 000 utilisateurs. [35]

IV-3 Un logiciel spécialise pour l'optimisation économique :

Dans la suite le fonctionnement d'Homer est analysé pour des systèmes hybrides comportant une photovoltaïque (il n'est pas possible de gérer plusieurs champs ou installations, par exemple,

Une centrale avec deux couples orientation/inclinaison);

Un ou deux groupes électrogènes; Avec ou sans unité de stockage électrochimique.

Cette architecture correspond au système de type fuel sa ver ou de stockage. Ce sont les seuls types de système représentés dans les installations étudiées au **Burkina-Faso** par **Cythelia**.

IV-4 Les paramètres:

Il convient de fixer les valeurs d'un certains nombre de paramètres pour commencer une simulation. Pour les paramètres tels que le nombre d'appareils et les puissances, il est possible de paramétrer plusieurs valeurs dont la valeur nulle (absence de l'appareil).

Ceci s'applique entre autre pour le nombre de batteries, la puissance des groupes électrogènes, la puissance du l'éolienne. Homer simule le fonctionnement du système pour chacune des valeurs paramétrées. Ces paramètres sont :

IV-4-1 Paramétrage des sources : [36]

Installation éolienne:

- Puissance installée et investissement correspondant;
- Coûts d'entretien et maintenance annuels;
- Choix du branchement, bus DC ou bus AC. La production DC entre en jeu lorsqu'un système de stockage électrochimique ou des charges absorbant du courant continu. Le choix dépend du déphasage entre les consommations et la production éolienne.
- Durée de vie des modules;
- Rendement du système;
- Influence de la température sur les performances du module.

Groupe électrogène:

- Puissance installée et investissement correspondant ;
- Cout d'entretien et maintenance annuel;
- Durée de vie. Elle est paramétrée en heures de fonctionnement contrairement à l'installation éolienne;
- La charge minimale;
- Consommation de fuel en fonction de la puissance. A partir de ces données le logiciel calcul deux facteurs qui lui permettent de trouver la courbe de rendement du groupe en fonction de sa charge.

IV-4-2 Paramétrage de l'unité de stockage: [36]**Batteries :**

- Marque, technologie de batterie et capacité unitaire. Une base de données contient ces caractéristique pour un certain nombre de modèles de batteries;
- Nombre de Strings. La quantité de batteries correspondante dépend de la tension de bus choisie ainsi que de la tension unitaire des batteries.

Convertisseur :(onduleur chargeur ou PV dans le cas d'une production DC)

- Puissance et investissement correspondant;
- Durée de vie;
- Rendement AC/DC;
- Rendement DC/AC.

IV-4-3 Paramétrage du gisement et des charges:**Charge:**

- Possibilité d'entrer un profil de charge annuel à l'échelle horaire;
- Moyenne de la consommation annuelles .Les données annuelles rentrées sont mises à l'échelle par rapport a cette moyenne. Paramétrer plusieurs moyennes permet de réalisé une analyse de sensibilité par rapport la consommation. [37]

Ensoleillement:

- Possibilité d'entrer un profil d'ensoleillement annuel à l'échelle horaire ou de donner les coordonnées du site pour qu'Homer génère le profil;
- Choix de la mis à l'échelle des données d'ensoleillement. Les irradiations sont augmentées ou diminués pour obtenir une nouvelle moyenne plus faible ou plus forte que celle du profil initial. Paramétrer plusieurs moyennes permet de réaliser une analyse de sensibilité par rapport à l'ensoleillement.

IV-4-4 Autres paramétrages:**Hypothèses financières:**

- Taux d'intérêt;
- Durée de vie du système;
- Part fixe du cout d'investissement;
- Part fixe du cout d'entretien et maintenance;
- Cout des pénalités en cas de coupure.

IV-5 Interfaces :

Le logiciel HOMER est facile à utiliser et son interface est similaire aux logiciels usuels, il est donc muni d'un menu dans le haut ainsi que des icônes que l'on peut utiliser sans aller dans les menus. On peut considérer que l'interface d'HOMER a trois zones importantes comme indiqué sur la Figure IV-1 : la zone de définition du système, celle des ressources et celle des résultats. [10]

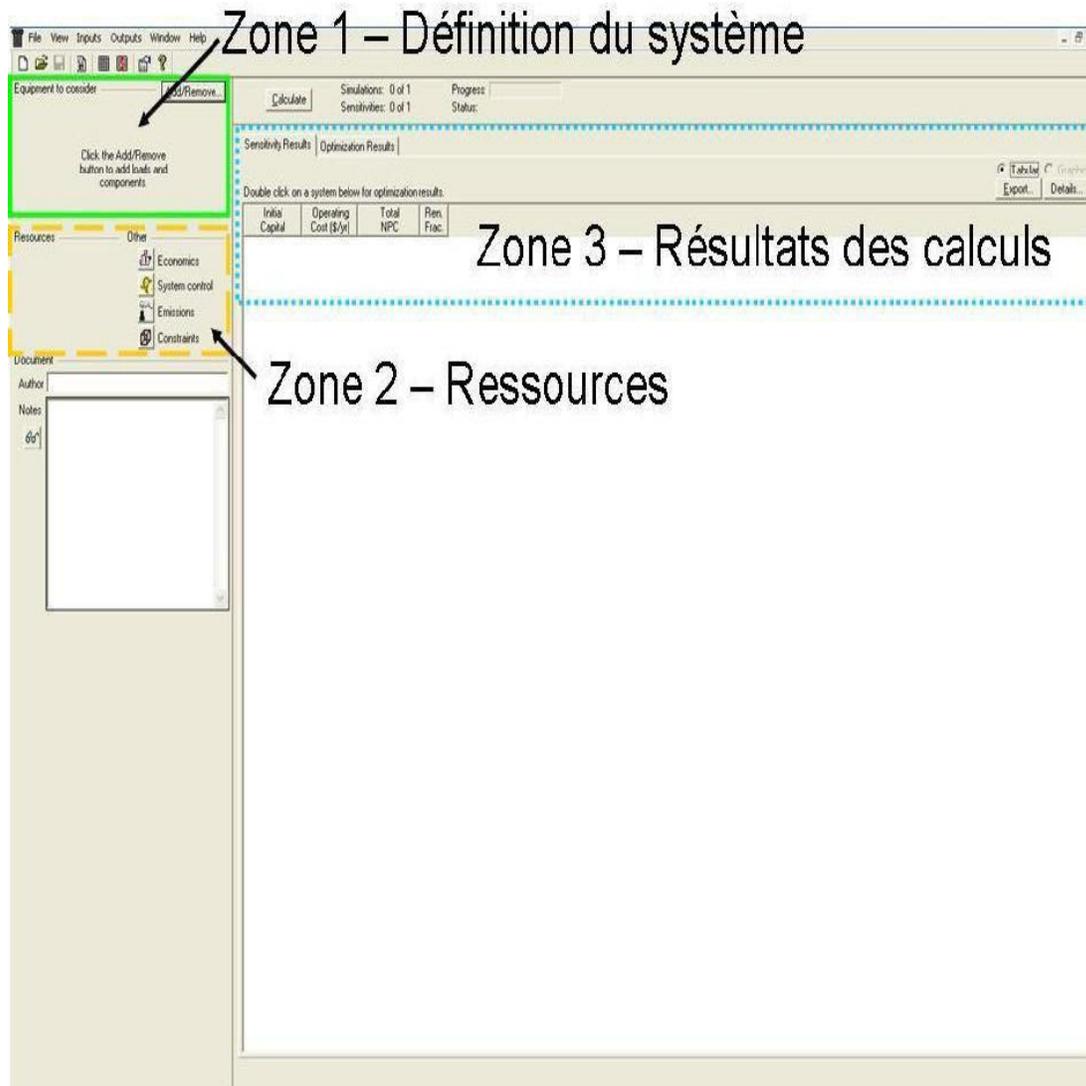


Figure IV-1: Interface HOMER – Fichier vierge.

La zone de définition du système permet de choisir les équipements qui seront inclus dans le système à modéliser. Il suffit de cocher les éléments à utiliser selon les choix illustrés à la Figure IV-2.

De plus, dans cette même fenêtre, il est possible de choisir : de modéliser le réseau électrique, d'en faire la comparaison avec un système hors réseau ou simplement de ne pas modéliser le réseau.

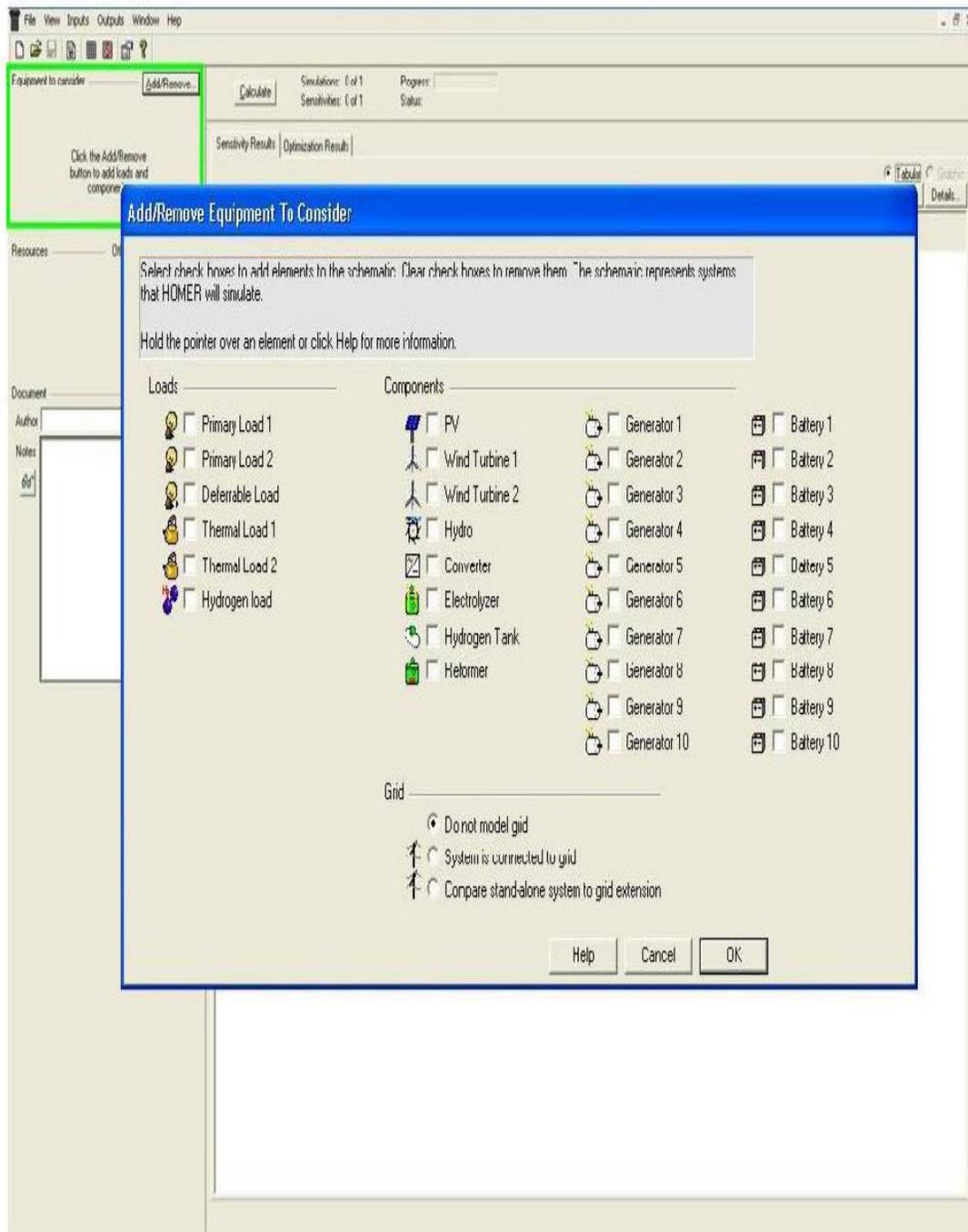


Figure IV-2: Interface HOMER – Équipements à ajouter.

Une fois sélectionnés, les divers équipements apparaissent dans la zone 1 de définition du système comme à la Figure IV-3 et les ressources nécessaires aux équipements sélectionnés apparaissent, elles, dans la zone 2 de définition des ressources comme à la Figure IV-4.

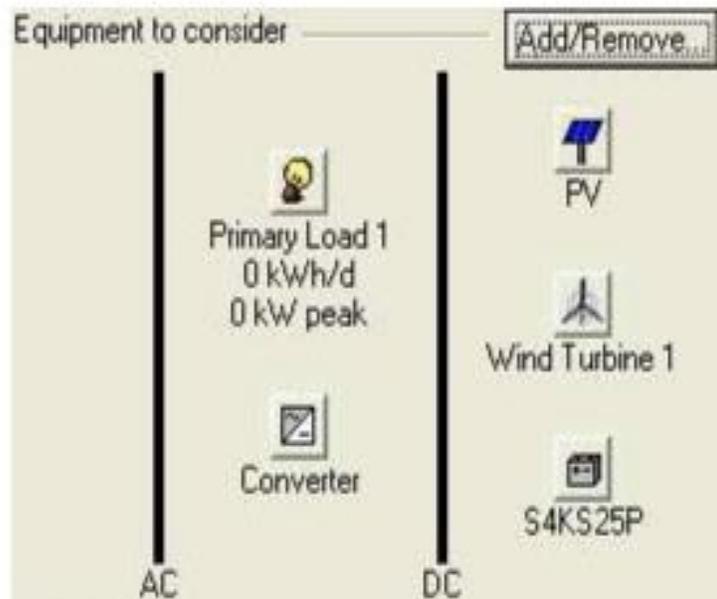


Figure IV-3: Interface HOMER – Équipements sélectionnés.



Figure IV-4: Interface HOMER – Ressources.

Dans ces deux zones, pour chaque icône, il y a une fenêtre à remplir ; ce sont les données à fournir pour faire une simulation. Les données d'entrée pour le présent projet seront définies dans la zone 4.

Une fois ces données sont entrées, on peut faire calculer HOMER, en cliquant sur l'icône comme il est illustré dans la Figure IV-5. [10]

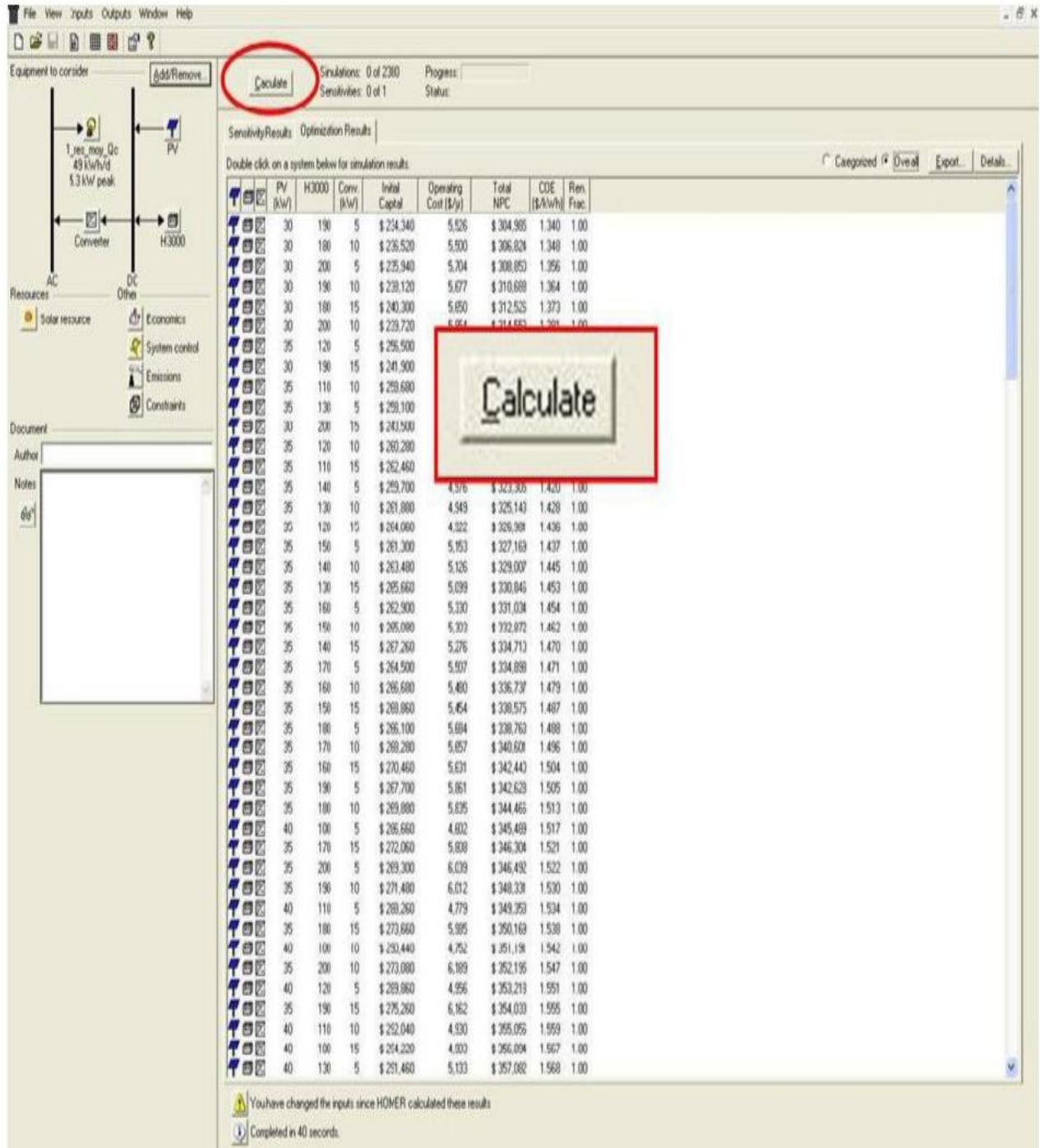


Figure IV-5: Interface HOMER – Fichier complété.

Lorsque le calcul est complété, les résultats apparaissent et la solution la plus économique est la première comme illustré à la Figure IV-6. Un résumé du système et des coûts reliés sont affichés dans la zone des résultats.

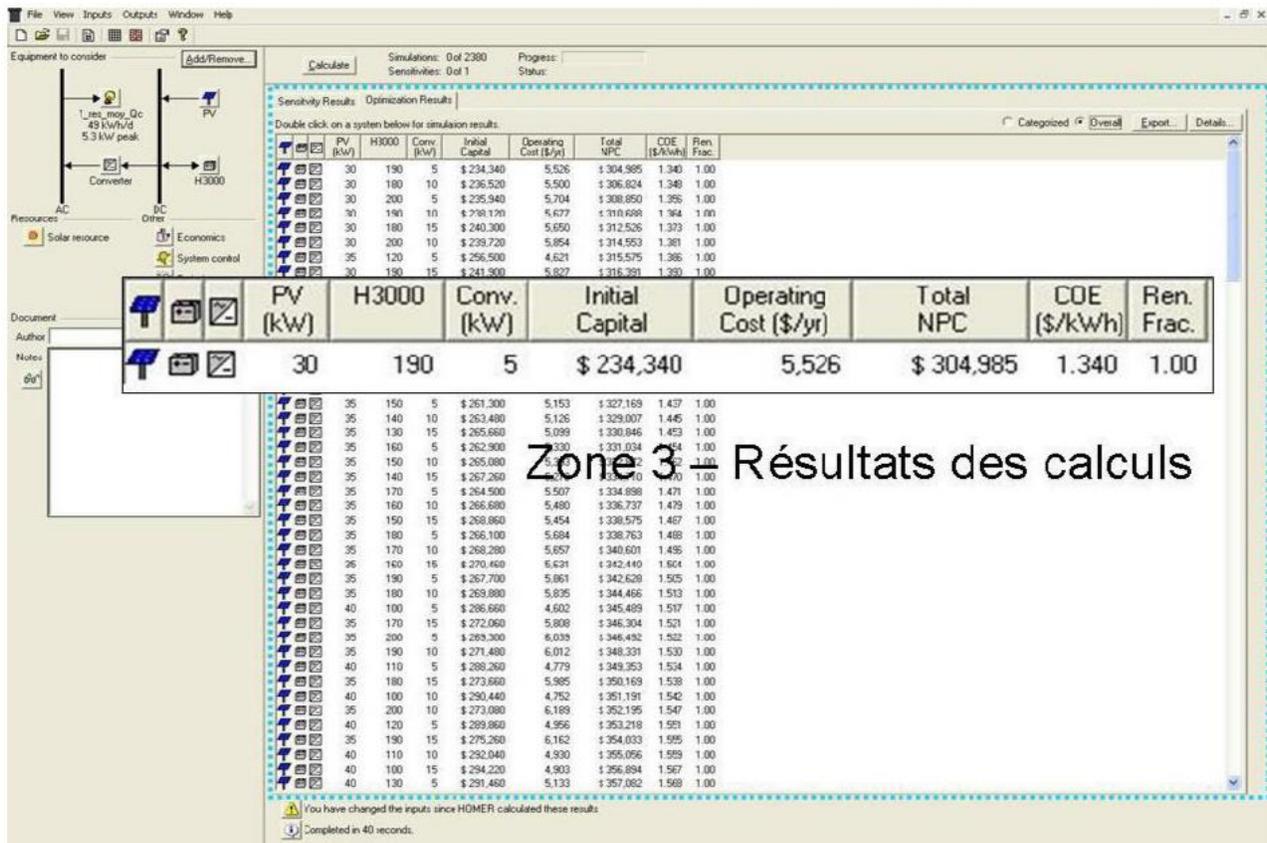


Figure IV-6: Interface HOMER – Résultats des calculs.

IV-6 Données d'entrée :

Les données à faire entrer sont celles reliées à la zone 1 et 2 du logiciel HOMER. Il s'agit de données reliées à la consommation énergétique, aux équipements (panneaux solaires photovoltaïques, éoliennes, génératrices, onduleurs, batteries ou autres équipements) et aux ressources nécessaires comme les données de gisement solaire ou éolien, aussi bien que les données reliées au combustible utilisé par la génératrice. Dans la zone 2 des ressources, il y a aussi certains paramètres économiques que l'on peut modifier. D'autres paramètres permettent différents contrôles du système (surtout au niveau de la simulation des banques de batteries et des génératrices). Dans la zone des ressources, on peut aussi mettre des pénalités monétaires pour les émissions émises ou bien un seuil limite d'émissions à ne pas dépasser lorsque la simulation sera effectuée. Finalement, certaines contraintes peuvent être exigées comme une fraction minimale d'énergie renouvelable à avoir dans le système ou encore accepter un certain pourcentage de déficits en énergie. Une fois toutes les sections remplies, Figure IV-7, on peut lancer la simulation en cliquant sur l'icône « calculer ». [10]

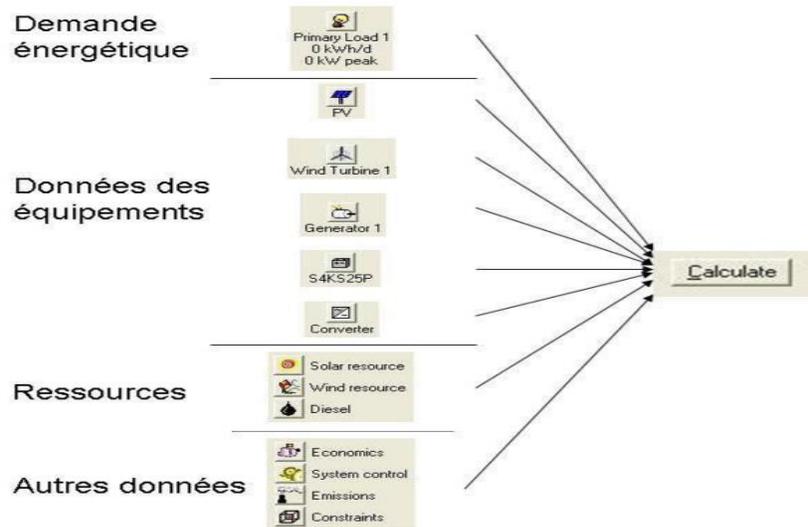


Figure IV-7: Données à fournir.

Plus de détails seront définis dans l'annexe 1 pour mieux décrire les informations à fournir pour chacun des icônes illustrés dans la Figure IV-7.

IV-7 Résultats pouvant être obtenus :

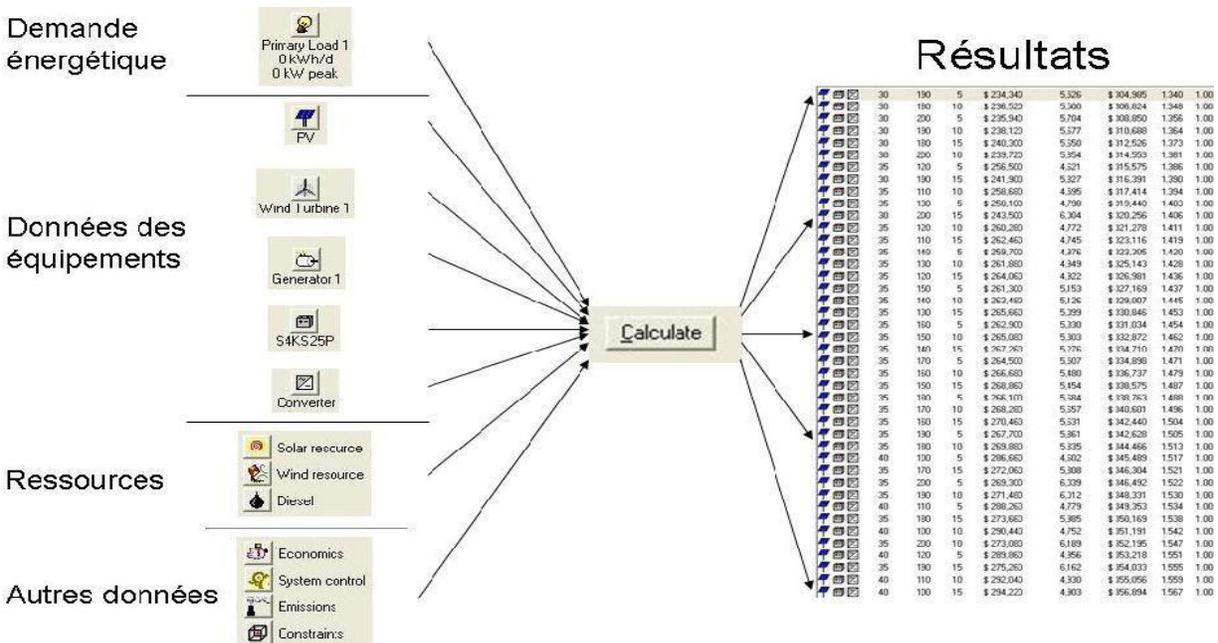


Figure IV-8: Résultats obtenus après simulation.

Une fois toutes les données ont été entrées et la simulation lancée, on obtient de nombreux résultats comme illustré à la Figure IV-8. Etant donné qu'il est possible de faire entrer de nombreuses configurations différentes pour un même type de système, il est possible de visualiser la liste des

résultats de deux façons : « *categorized* » et « *overall* ». Si on choisit l'option « *categorized* », la liste présente l'option la plus économique pour chaque catégorie de système et donc par type de système. Par exemple, HOMER affichera seulement la meilleure option pour un système de type photovoltaïque avec batteries même si la simulation a été faite selon plusieurs configurations différentes (différents nombres de panneaux, différents nombres de batteries). Pour l'option « *overall* », HOMER affiche tous les systèmes sur la même liste. Le premier résultat affiché est le plus économique parmi tous les types de systèmes simulés. Il est donc important d'optimiser chaque type de système afin d'éliminer les systèmes qui ne sont pas viables. Pour ce faire, on effectue plusieurs simulations dans le but de converger vers un système optimal pour chaque type de système.

Il est très important de se rappeler que le premier résultat donné par HOMER dans la liste des résultats est toujours le système le plus économique trouvé selon « *Net Present Cost* » (coût à valeur actuelle) parmi tous les systèmes et toutes les configurations simulés. Comme mentionné précédemment, les résumés des systèmes et des coûts liés sont affichés dans la zone des résultats.

Un exemple de résumé est montré à la Figure IV-9. On y retrouve les informations suivantes : icônes des équipements du système (partie 1) et leur capacité ou le nombre de batteries (partie 2), l'investissement initial devant être fait (partie 3), les coûts d'opération par an (partie 4), le coût total du système à la valeur actuelle (partie 5), le coût de l'énergie en \$/kWh (partie 6) et finalement, la proportion d'énergie renouvelable utilisée dans le système (partie 7).

1	2	3	4	5	6	7	
PV (kW)	H3000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.
30	190	5	\$ 234,340	5,526	\$ 304,985	1.340	1.00

Figure IV-9: Résumé des résultats.

Pour plus de détails sur les différents résultats obtenus dans HOMER, il faut cliquer sur le résultat désiré et une fenêtre, Figure IV-10, s'ouvre avec plus d'informations.

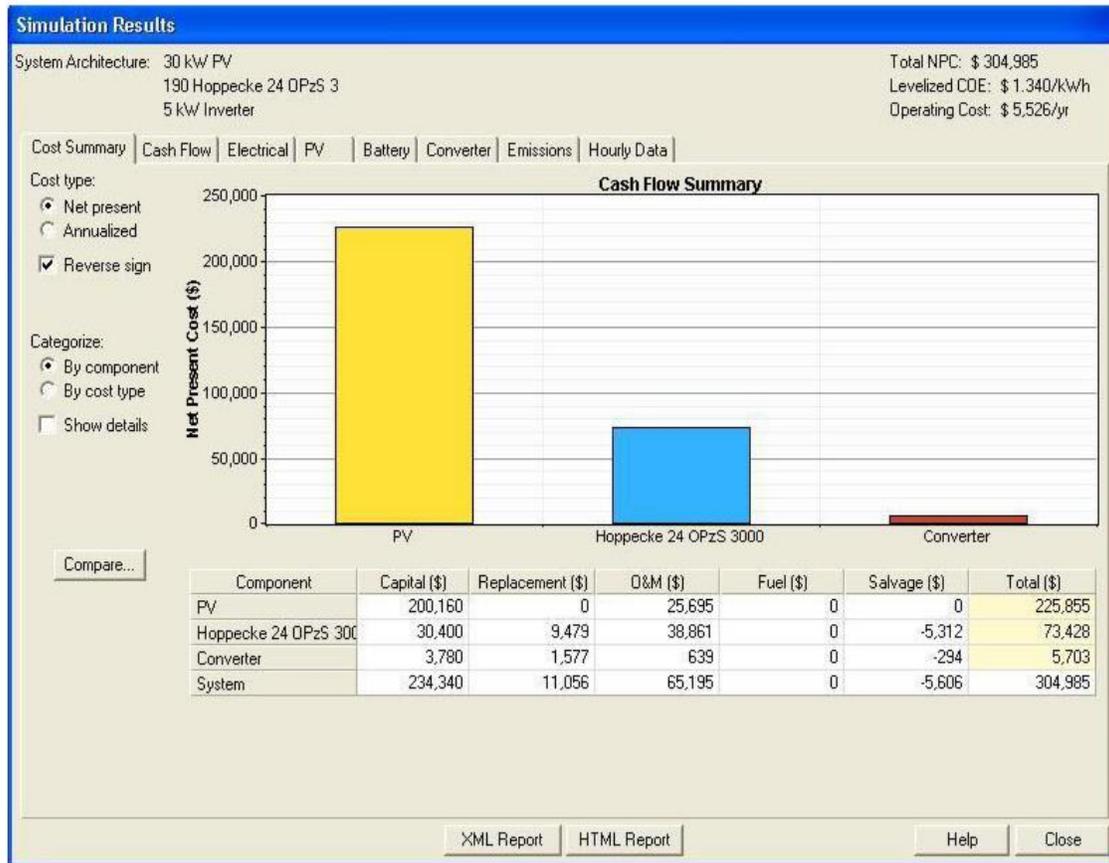


Figure IV-10: Fenêtre des résultats détaillés.

Dans cette fenêtre, on retrouve des onglets comme le résumé des coûts, le flux monétaire, des informations sur l'électricité (production, consommation, excès d'énergie, etc.), des détails sur l'énergie et la puissance offertes des équipements (panneaux, batteries, convertisseur), le détail des émissions et finalement, on peut visualiser les données simulées d'heure en heure. [10]

IV-8 Méthodologies spécifiques aux simulations :

Une démarche pour le dimensionnement est définie conjointement avec une démarche pour les simulations sur HOMER pour les systèmes.

La démarche générale pour le dimensionnement et les simulations est résumée en quelques étapes :

- 1- Évaluation de la demande énergétique (consommation d'énergie);
- 2- Pré-dimensionnement à la main des équipements;
- 3- Identifier les équipements nécessaires au système (panneaux solaires, convertisseur, batteries) dans le logiciel HOMER;
- 4- Entrer les données nécessaires dans le logiciel :

- de consommation énergétique;
 - b. de gisement solaire pour le lieu désiré;
 - c. pour les équipements (prix des équipements et coût d'opération et d'entretien);
- 5- Lancer le calcul dans HOMER;
 - 6- Optimiser les résultats du logiciel HOMER de façon itérative pour arriver à la solution optimale pour ce système;
 - 7- Faire des analyses de sensibilité, si nécessaire;
 - 8- Valider le système.

IV-9 Les sorties :

A partir de la simulation, Homer permet de visualiser le comportement heure par heure de chaque équipement de l'installation pour toutes les configurations simulées.

A partir de ces résultats, Homer présente une analyse financière sur la durée du projet. Ainsi, pour chaque architecture et configuration il est possible d'observer les sorties suivantes :

- Coût global du kWh actualisé ;
- Répartition des postes de dépenses (investissement, entretien/maintenance, combustible);
- Le détail correspondant à chaque source : flux d'énergies, nombre de remplacements, coût fixe et cout marginal, proportion de la production électrique ;
- Des graphiques journaliers sur toute la durée de vie du système présentant heure par heure les consommations, les puissances délivrées par chaque source, la quantité d'énergie stockée ;
- Des graphiques d'analyse de sensibilité. Il permet d'observer la variation de certaines sorties par rapport à paramètres de sensibilité choisis;
- Une analyse économique par rapport à une installation de référence ;
- Une analyse de sensibilité présentée sous forme graphique. [35]

IV-10 Le fonctionnement :

Pour chaque configuration, c'est-à-dire pour un choix de valeurs parmi toutes celles disponibles pour chaque paramètre, Homer effectue une analyse temporelle de l'installation.

A chaque pas de temps le logiciel observe la consommation et la compare à la production éolienne qu'il a calculée en fonction du gisement pris en compte. L'énergie éolienne est prioritaire car il n'est pas possible de reporter son utilisation. Dans le cas d'un manque de cette énergie HOMER doit choisir entre l'usage du GE ou des Batteries. La source la moins coûteuse sera utilisée sauf si certaines contraintes entrent en jeu. Comme il est précisé dans la notice, la simulation effectuée par Homer est

idéalisée par rapport aux systèmes de contrôle commande réels. La simulation agit de façon à optimiser le coût total de fonctionnement de la centrale hybride, ce qui n'est pas forcément le cas de ces derniers. Les différences seront explicitées dans la partie « Les résultats ». Pour comparer les coûts du kWh produit par les différentes sources, le logiciel utilise des règles et des modèles qui peuvent être influencés par les paramètres choisis par l'utilisateur. Ainsi Homer considère que les sources auxiliaires ont un coût fixe et un coût marginal. [37]

IV-11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons expliqué le logiciel HOMER permettant une compréhension idéale du fonctionnement du programme ainsi que les objectifs à atteindre. Il offre une approche orientée sur la réalisation de projets plutôt qu'une approche d'optimisation de systèmes. Après l'introduction de tous les rapports de prix, les types d'appareils utilisés et les données météorologiques nécessaires le long de l'année.

On peut utiliser HOMER pour simuler un système de production d'électricité, optimiser les options de conception selon des critères de coûts et d'efficacités, ou pour analyser le comportement du système lors de la variation de paramètres comme la disponibilité des ressources et dévolution de la consommation d'électricité. Le chapitre suivant qui est la partie de simulation.

Chapitre V

Simulation dans le HOMER

V-1 Introduction:

Dans but d'améliorer la qualité de l'énergie produite par un système de production d'énergie électrique, un système hybride est proposé dans ce chapitre. Une application d'un système hybride est simulée sur le logiciel HOMER afin d'alimenter un site situé dans une région de la ville d'EL-Kheiter, pour une optimisation qui permet de déterminer le type du système hybride réel a installé.

Après avoir effectué le dimensionnement des différents composants des SEH, on va simuler les différentes configurations de notre système d'étude. Ce qui implique l'insertion des données suivantes dans le logiciel HOMER:

- Les Coûts associés à l'utilisation de chaque composant du système;
- Les Coûts de remplacement de chaque matériel en tenant compte de leur durée de vie, laquelle est dépendante de leur sollicitation;
- Pour chaque composant: la production utile, le taux d'utilisation, les horaires d'utilisation, la durée de vie moyenne.

On obtient de nombreux résultats sous forme de liste de plusieurs configurations possibles:

- La configuration triée par coût et cycle de vie.
- La configuration triée par type de système.

Toutes les deux sont classées selon le critère du coût actuel (NPC) et le coût d'énergie (COE). Ces coûts permettent de comparer les différentes options pour la conception d'un système hybride optimal.

Enfin, le système optimal choisi est comparé à la situation connecté au réseau, afin de calculer la distance minimale séparant le site d'étude au réseau et correspondante au seuil de rentabilité du SEH.

V-2 Schéma de conception du système hybride:

La figure ci- dessous montre le système global qui sera étudié on utilisant le logiciel HOMER qui comprend les panneaux solaire, les turbines éoliennes, le groupe diesel, les convertisseurs et les batteries.

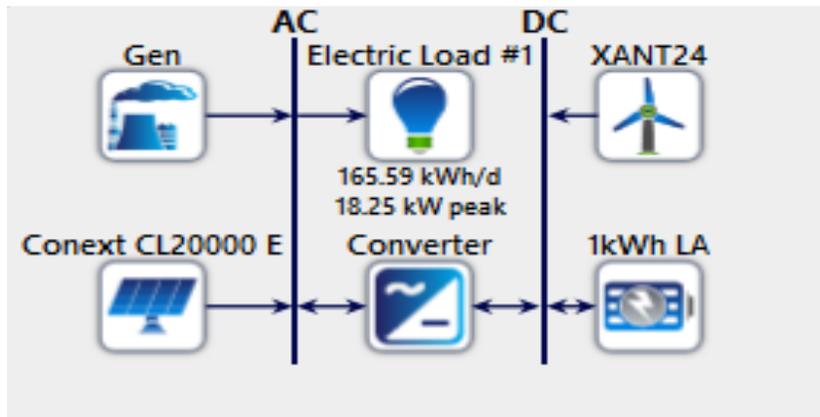


Figure V-1: Montage électrique du système hybride.

V-3 Simulation des composants de système:

V-3-1 Choix du générateur:

Le générateur que nous considérons dans cette étude est un générateur diesel qui s'auto-dimensionne de façon à ce qu'il réponde à toute la charge. Il ne présente pas, donc, une capacité de stockage excédentaire. De plus, il ajuste sa courbe de carburant à sa taille. La figure V-2 représente les spécifications techniques du générateur que nous considérons dans notre étude.

Figure V-2: Les données du coût du GD.

Désignation	Valeur	Unité
Pouvoir calorifique intérieur	43.2	MJ/ Kg
Masse volumique	820	Kg/m ³
Taux de carbone	88	%
Taux de soufre	0.4	%

Tableau V-1: Propriétés physiques du diesel.

La carte de données de la puissance éolienne produite est donnée par HOMER et montre que la courbe du carburant du GD évolue linéairement avec la puissance nominale (Figure V-3).

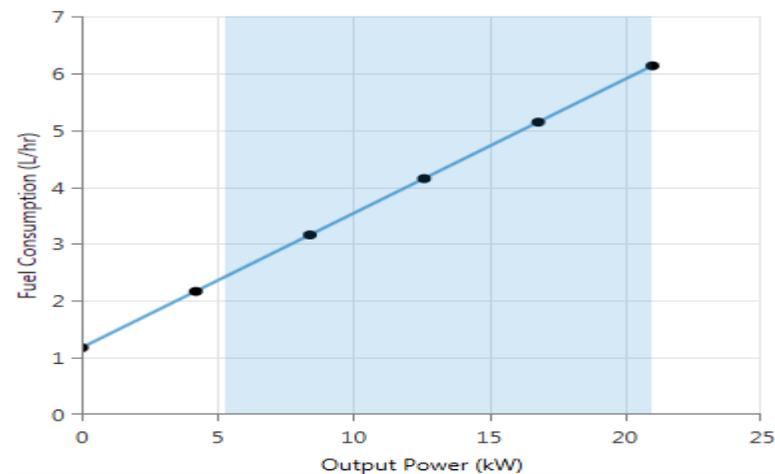


Figure V-3: Courbe de consommation de carburant du GD.

Le profil journalier de la production diesel, le long de l'année, donné par la figure V-4;

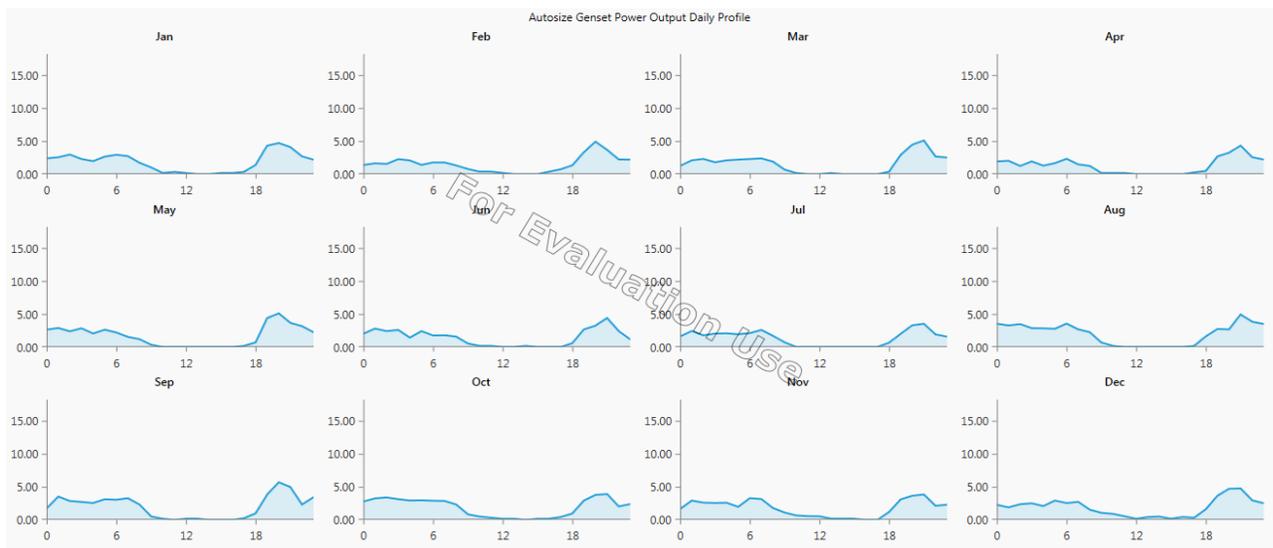


Figure V-4: Profil journalier de la production du GD.

Le diagramme ci-dessous illustre la production journalière du diesel durant toute l'année. La couleur noire représente, selon l'échelle à droite, les périodes de l'arrêt et/ou à très faible production, alors que la couleur rouge montre les deux pics. La production moyenne est représentée par la couleur verte. Les périodes d'arrêt, citées précédemment, sont bien illustrées dans ce diagramme (les zones en noire).

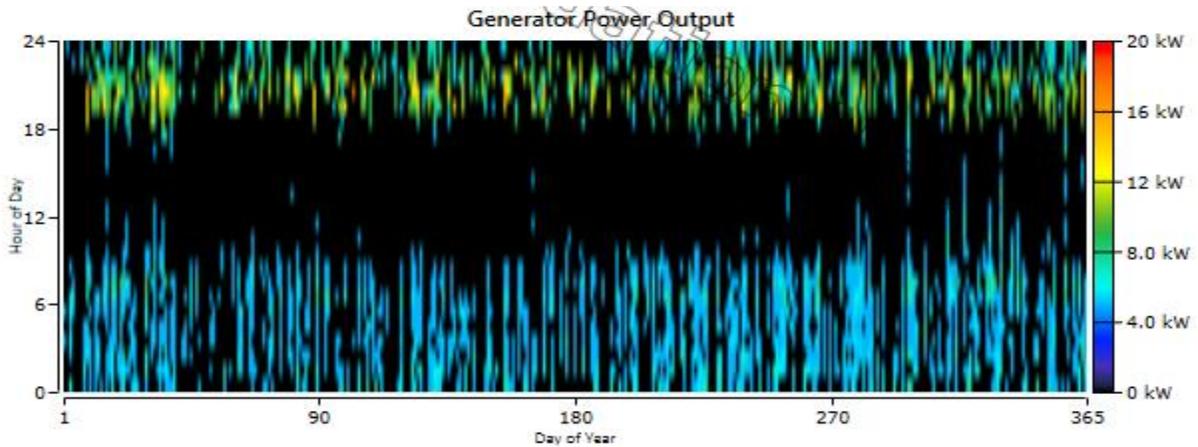


Figure V-5: Production journalière moyenne du Diesel pour toute l'année.

V-3-2 Choix des PV:

Les photovoltaïques sont des composantes électronique qui transforment les rayons lumineux du soleil en électricité par les cellules. Le coût du PV varie linéairement avec sa taille. Dans notre étude, le cout des panneaux photovoltaïques est évalué à 3000\$, le coût de remplacement est estimé à 3000\$ et le coût d'exploitation et de maintenance est estimé à 10\$/an. La figure V-6 représente les spécifications techniques du générateur PV que nous considérons dans notre étude.

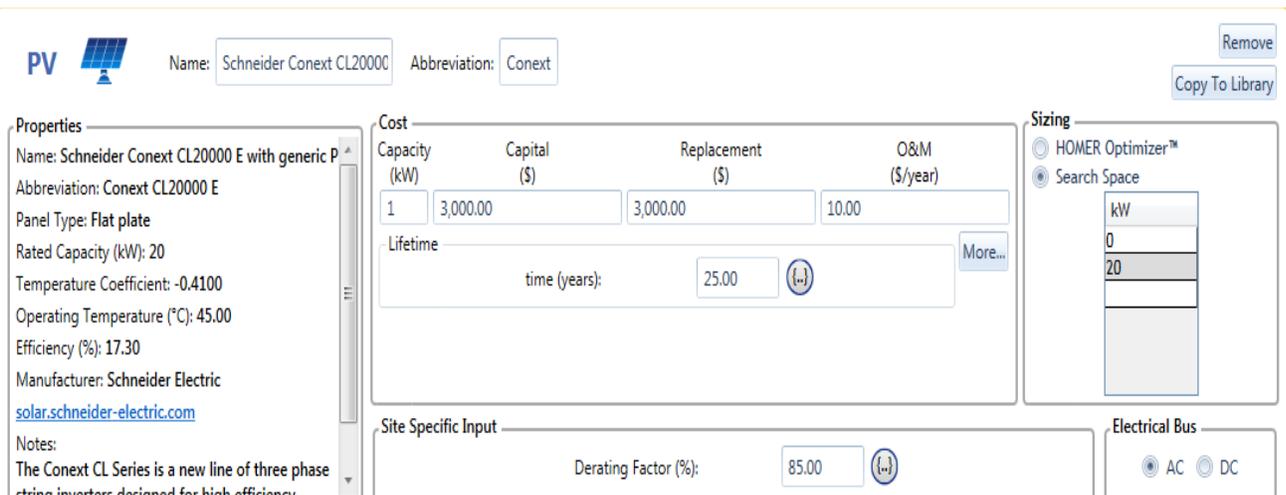


Figure V-6: Les données du coût du PV.

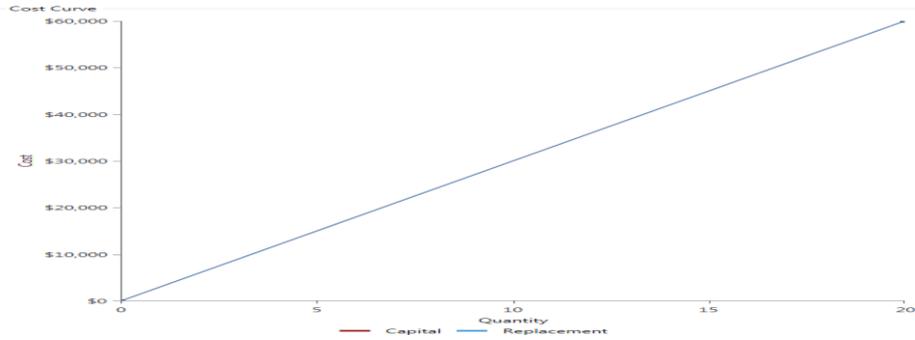


Figure V-7: Courbe du coût du PV.

Les puissances journalières moyennes ainsi que les puissances mensuelles moyennes pour chaque mois de l'année, sont représentées respectivement par les courbes des figures.

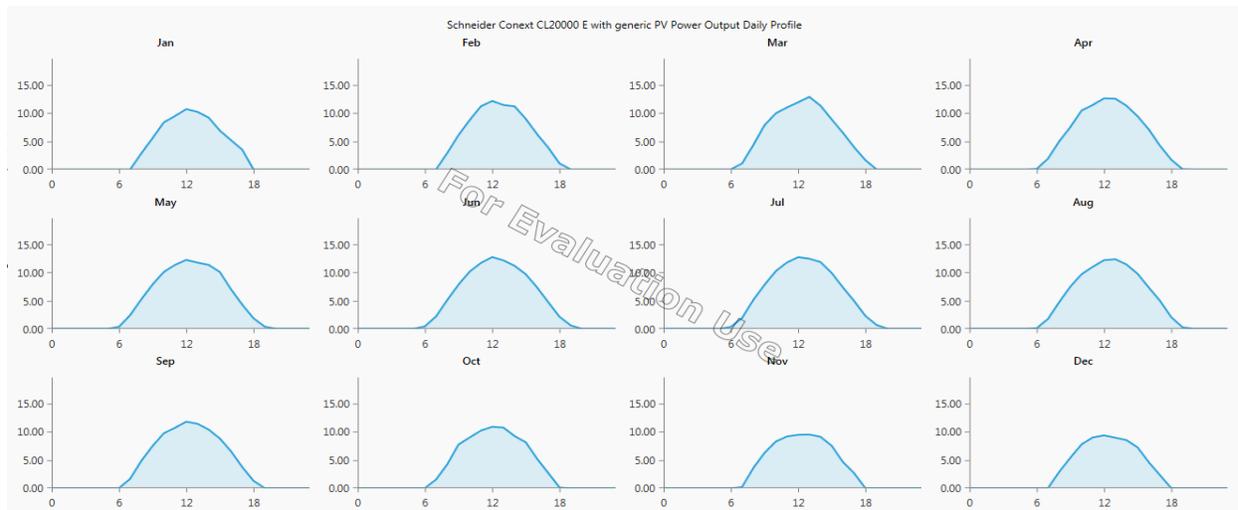


Figure V-8: Puissance journalières moyennes délivrées par le PV.

Le diagramme ci-dessous illustre la production journalière du générateur photovoltaïque durant toute l'année. La couleur noir représente, selon l'échelle à droite, les périodes de l'arrêt. La couleur bleu pour les périodes à très faible production et la jaune pour celles à forte production, alors que la couleur rouge montre les deux pics durant le mois de janvier et novembre à la même heure c'est-à-dire de 11h à 15h. La production moyenne est représentée par la couleur verte.

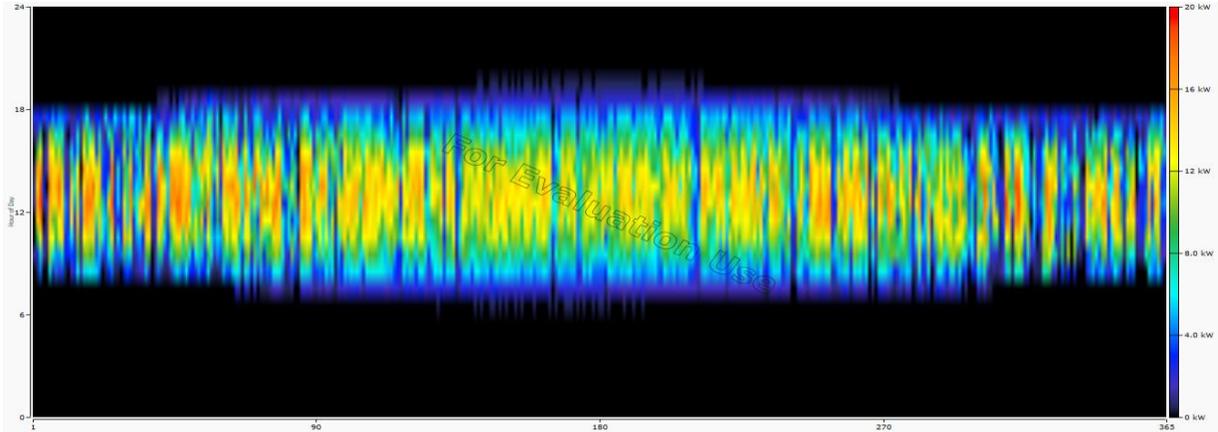


Figure V-9: Production mensuelles moyenne du PV.

V-3-3 Choix des éoliennes:

La turbine éolienne ayant une caractéristique qui lui est propre et qui dépend des paramètres de construction qui définissent son potentiel à prélever l'énergie de la masse d'air en mouvement. La turbine choisie est XANT M-24.

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$2,000.00	\$2,000.00	\$10.00

Figure V-10: Les données du coût d'éolien.

La caractéristique de puissance de l'éolienne XANT M-24 95 [kW] DC, en fonction de la vitesse du vent est donnée par la figure (V-11) ci-dessous ;

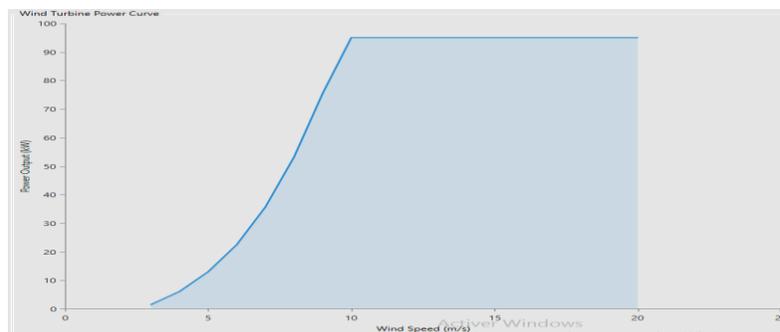


Figure V-11: Caractéristique de puissance de l'éolienne choisie en fonction de la vitesse du vent.

On remarque que ces courbes sont très semblables avec celles qui représentent la distribution des vitesses moyennes journalières du vent données au chapitre III. Les mois les plus ventés (Mars, Avril, Jul) sont caractérisés par une production par rapport aux autres mois.

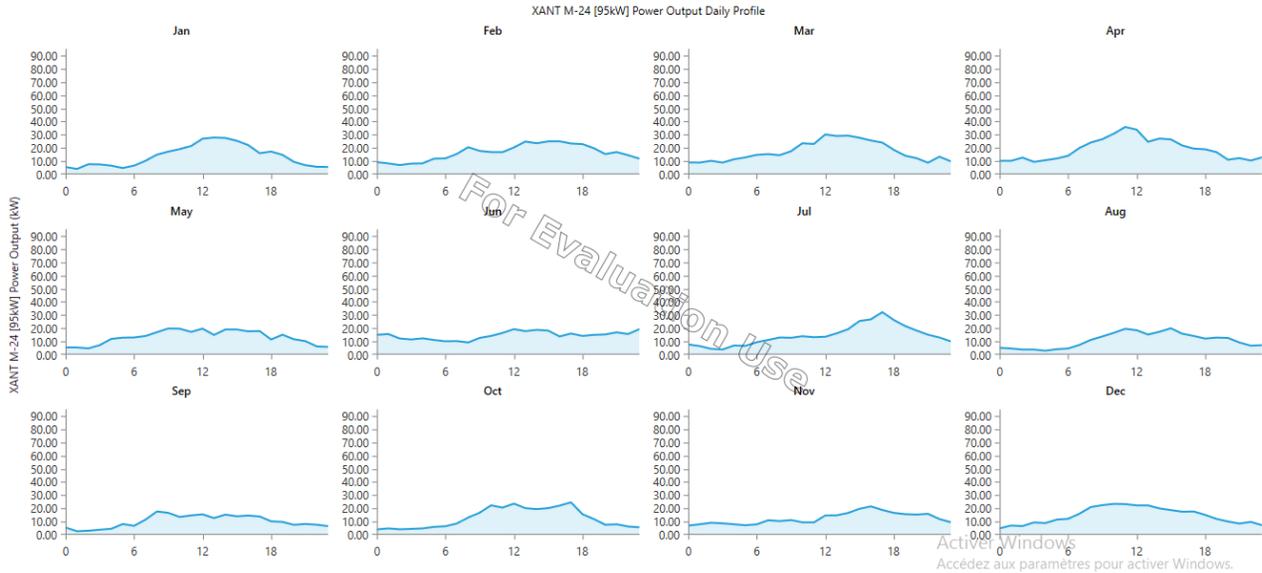


Figure V-12: Puissance journalières moyennes délivrées par la turbine éolienne.

La carte des données des puissances éolienne produite est donnée par la figure V-13 suivante ;

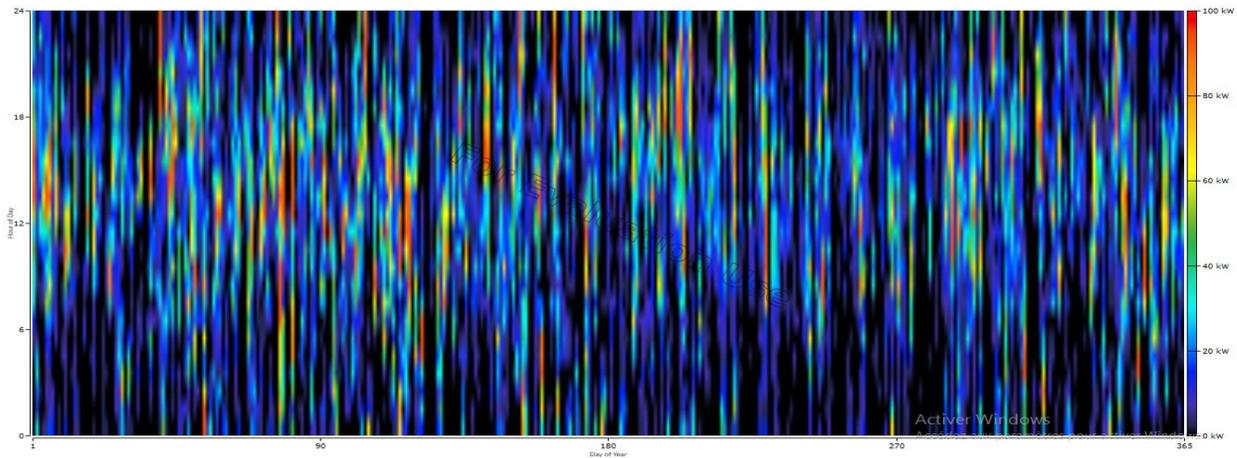


Figure V-13: DMap de la puissance éolienne produite.

V-3-4 Choix des batteries:

L’installation peut fonctionner sans système de stockage, cependant, le rôle des batteries est essentiellement pour mieux optimiser les paramètres de fonctionnement, dans le sens de minimiser la part de l’énergie produite par le générateur classique. L’excès de production par les générateurs renouvelables est donc stocké dans les batteries, on peut ainsi minimiser la consommation du combustible et les émissions des gaz.

STORAGE Name: Generic 1kWh Lead Acid Abbreviation: 1kWh L

Remove
Copy To Library

Properties
Kinetic Battery Model
Nominal Voltage (V): 12
Nominal Capacity (kWh): 1
Maximum Capacity (Ah): 83.4
Capacity Ratio: 0.403
Rate Constant (1/hr): 0.827
Roundtrip efficiency (%): 80
Maximum Charge Current (A): 16.7
Maximum Discharge Current (A): 24.3
Maximum Charge Rate (A/Ah): 1
www.homerenergy.com

Cost

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	300.00	300.00	10.00

Lifetime
time (years): 10.00
throughput (kWh): 800.00

Sizing
 HOMER Optimizer™
 Search Space
 Advanced

Site Specific Input
String Size: 1 Voltage: 12 V
Initial State of Charge (%): 100.00
Minimum State of Charge (%): 40.00

Figure V-14: Les données du coût de la batterie.

V-3-5 Choix des convertisseurs:

Le fonctionnement de convertisseur est lié à la demande sur l'énergie stockée, l'étude de son fonctionnement nous permet de prévoir les périodes de décharge des batteries. Le fonctionnement du redresseur est lié à l'état de charge des batteries, l'analyse de son fonctionnement est très importante, car elle nous permet de prévoir les périodes de recharge des batteries et ainsi les générateurs utilisés pour cette opération (PV, WT, DG).

CONVERTER System Converter Name: System Converter Abbreviation: Convert

Remove
Copy To Library

Properties
Name: System Converter
Abbreviation: Converter
www.homerenergy.com
Notes:
This is a generic system converter.

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$300.00	\$300.00	\$0.0

Click here to add new item

Capacity Optimization
 HOMER Optimizer™
 Search Space
 Advanced

Inverter Input
Lifetime (years): 15.00
Efficiency (%): 95.00
 Parallel with AC generator?

Rectifier Input
Relative Capacity (%): 100.00
Efficiency (%): 95.00

Figure V-15: Les données du coût du convertisseur.

V-4 Courbe de charge du site étudié:

Le dimensionnement d'un tel système de production de l'énergie dépend essentiellement du profil de la consommation à satisfaire. La figure ci-dessous représente un profil de l'évolution journalière de la charge. Ce profil est considéré le même durant tous les jours de l'année.

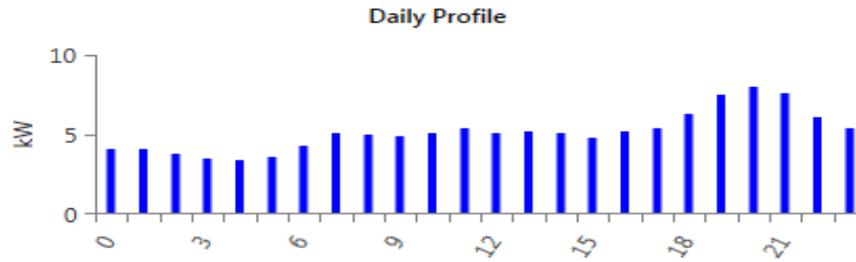


Figure V-16: Profil journalier de la courbe de charge.

On remarque que le profil de consommation a généralement la même tendance d'évolution journalière. Il y a un creux de consommation la nuit entre 00h et 05h et un pic de consommation, le soir entre 18h et 23h. Ces informations restent très difficiles à exploiter car le profil de consommation est aussi variable selon les saisons.

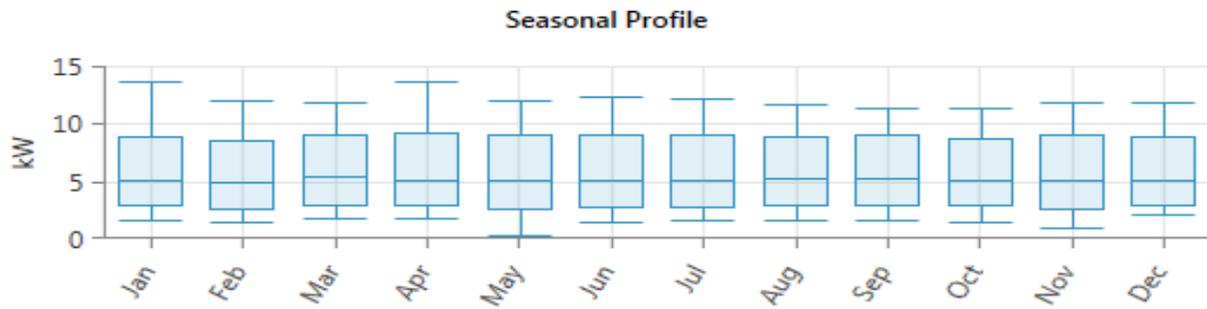


Figure V-17: Le profil de charge dans une année.



Figure V-18: Le profil de charge journalière suivant les saisons.

V-5 Simulation du système d'énergie hybride:

Le système considéré pour l'optimisation est un système autonome PV/Eolienne/GD avec le stockage. Nous détaillons ici les caractéristiques technologiques et financières de ce système hybride afin de les insérer dans le programme de simulation conjointement avec les données météo afin d'obtenir les dimensions optimales du système et les comparer économiquement à celles de l'extension du réseau.

La figure V-19 montre clairement que la production PV et le parc de batterie couvre entièrement et à tout moment la demande énergétique et le GD sert de source d'appoint de changement des batteries au cas où ces dernières se déchargent.

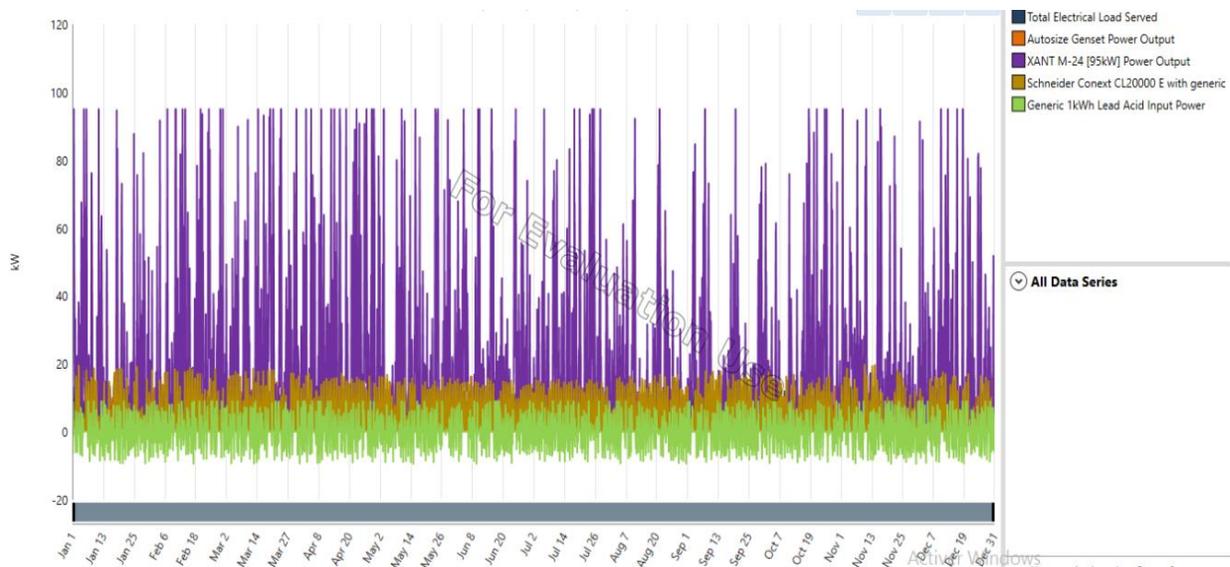


Figure V-19: Evolution horaire annuelle, de la demande et la production.

V-5-1 Résultats de simulation:

Dans le tableau V-2, sont illustrés les résultats issus de l'étude de dimensionnement, après avoir simulé toutes les configurations possibles du système hybride. Dans les conditions de charge, coût des composants et disponibilité des ressources présentées antérieurement.

Architecture								Cost				System	
Conext CL20000 E (kW)	Conext CL20000 E-Inv. (kW)	XANT24	Gen (kW)	1kWh LA	Converter (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Hours
		1	21.0	43	15.5	LF	\$219,282	\$0.281	\$14,639	\$30,038	67.0	8,123	2,911
20.0	20.0	1	21.0	40	15.5	LF	\$232,069	\$0.297	\$11,056	\$89,138	76.8	5,713	2,054
		1	21.0		14.9	CC	\$330,340	\$0.423	\$24,241	\$16,963	37.3	16,220	6,194
20.0	20.0	1	21.0		14.9	CC	\$375,078	\$0.480	\$23,061	\$76,963	42.1	15,205	5,924
20.0	20.0		21.0	38	9.89	CC	\$390,770	\$0.500	\$23,663	\$84,866	32.7	14,233	3,946
20.0	20.0	1		525	24.5	CC	\$420,506	\$0.539	\$14,981	\$226,839	100	0	
			21.0	20	4.96	CC	\$476,318	\$0.610	\$35,454	\$17,988	0	23,815	7,830
			21.0			CC	\$480,293	\$0.615	\$36,341	\$10,500	0	25,007	8,760
20.0	20.0		21.0			CC	\$522,477	\$0.669	\$34,962	\$70,500	7.74	23,436	8,755

Tableau V-2 : Résultat d'optimisation.

Le tableau permet de visualiser toutes les configurations de système faisables, en effet HOMER affiche une liste des configurations système qu'il a constaté faisable pour ce projet. Ils sont énumérés dans l'ordre (de haut en bas) de la plus rentable à la moins rentable. Le rapport coût-efficacité d'une Configuration système est basé sur son coût nette actuelle. La configuration PV/ éolienne / GD /batteries /convertisseur est la plus rentable conception.

Architecture								Cost				System	
Conext CL20000 E (kW)	Conext CL20000 E-Inv. (kW)	XANT24	Gen (kW)	1kWh LA	Converter (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Hours
		1	21.0	43	15.5	LF	\$219,282	\$0.281	\$14,639	\$30,038	67.0	8,123	2,911
20.0	20.0	1	21.0	40	15.5	LF	\$232,069	\$0.297	\$11,056	\$89,138	76.8	5,713	2,054
		1	21.0		14.9	CC	\$330,340	\$0.423	\$24,241	\$16,963	37.3	16,220	6,194
20.0	20.0	1	21.0		14.9	CC	\$375,078	\$0.480	\$23,061	\$76,963	42.1	15,205	5,924
20.0	20.0		21.0	38	9.89	CC	\$390,770	\$0.500	\$23,663	\$84,866	32.7	14,233	3,946

Tableau V-3: Classement des systèmes par HOMER.

D'après le tableau, on remarque que le meilleur système serait celui de (éolienne/GD/batteries) dans la 1^{ère} ligne. Mais si nous parlons du 2^{ème} meilleur système hybride nous le trouvons dans la 2^{ème} ligne, malgré que la grande valeur de (NPC) soit 232069\$, Aussi la différence légère dans la valeur (COE) soit 0.297\$, Cependant il contient toutes les composantes possibles (PV/éolienne/GD/ batteries), addition la consommation totale de carburant et l'émission Dioxyde de carbone moins que les autres systèmes.

Les systèmes	PV (Kw)	Eolienne (Kw)	GD (Kw)	Batterie (Kw)	Convertisseur (Kw)	NPC (\$)	COE (\$)	carburant total (L/an)	Dioxyde de carbone (Kg/an)
Système 1	-	1	21	43	15.5	219282	0.293	8123	21262
Système 2	20	1	21	40	15.1	232069	0.297	5713	14955
Système3	-	1	21	-	14.9	330340	0.423	16222	42457

Tableau V-4: Les différentes configurations d'optimisation de site EL-Kheiter.

V-5- 2 Etude techno-économique:

Les coûts de chaque composant des systèmes d'alimentation hybrides incluant principalement les panneaux photovoltaïques, les turbines éoliennes, le générateur diesel, les batteries, et le convertisseur, avec un capital de remplacement, les coûts d'opérations de maintenance et de récupération.

Cost Summary

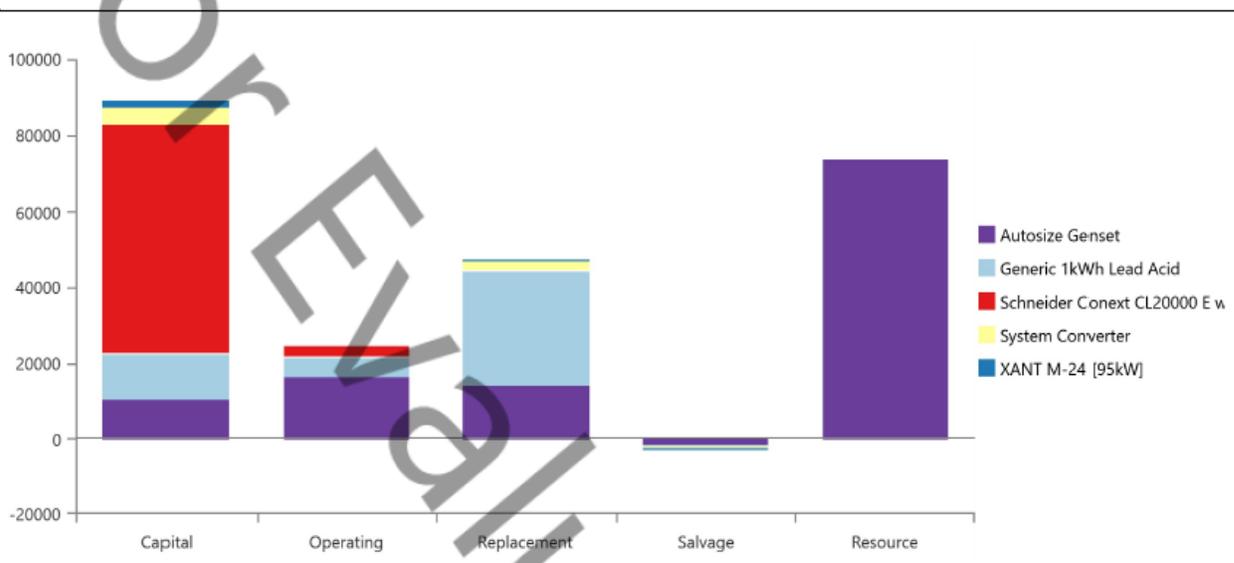


Figure V-20: Résumé des coûts pour le système hybride.

Le frais financiers sont donnés dans le tableau du système d'alimentation hybride proposé, sont de l'ordre de 87325\$ avec remplacement, O & M et prix du carburant 47347\$, 24614\$, 73859\$ et respectivement, enfin la valeur de récupération est 2890\$. Les frais financiers annuels du cout actuel ne total (NPC) sont représenté par le photovoltaïque 62585\$, la turbine éolienne 2407\$, et les batteries 46782\$ en notant le faible coût un peu pour les autres composants.

Le résultat d'optimisation trouvé montre que donne le coût nécessaire pour réaliser ce projet qui est de l'ordre de 232069\$.

Component	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
Autosize Genset	\$10,500.00	\$14,474.79	\$16,728.46	\$73,859.99	(\$1,450.52)	\$114,112.72
Generic 1kWh Lead Acid	\$12,000.00	\$30,267.59	\$5,171.01	\$0.00	(\$710.09)	\$46,728.51
Schneider Conext CL20000 E with generic PV	\$60,000.00	\$0.00	\$2,585.50	\$0.00	\$0.00	\$62,585.50
System Converter	\$4,637.50	\$1,967.57	\$0.00	\$0.00	(\$370.32)	\$6,234.75
XANT M-24 [95kW]	\$2,000.00	\$637.61	\$129.28	\$0.00	(\$359.34)	\$2,407.55
System	\$89,137.50	\$47,347.57	\$24,614.25	\$73,859.99	(\$2,890.26)	\$232,069.04

Tableau V-5: Coût de l'installation.

V-5-3 Production et consommation d'énergie électrique:

La production et la consommation annuelle d'électricité du système sont détaillées dans le tableau V-6.

Production	kWh/yr	%
Schneider Conext CL20000 E with generic PV	31,545	18.6
Autosize Genset	13,995	8.27
XANT M-24 [95kW]	123,656	73.1
Total	169,196	100

Tableau V-6: Energie annuelle produite.

On remarque que 73.5% des besoins énergétiques du site sont produits par le générateur éolien, et 18.6% sont produits par le générateur photovoltaïque, et le reste 8.27% est assuré par la source d'énergie conventionnelle (diesel). La production totale est estimée à 169196 KWH/an.

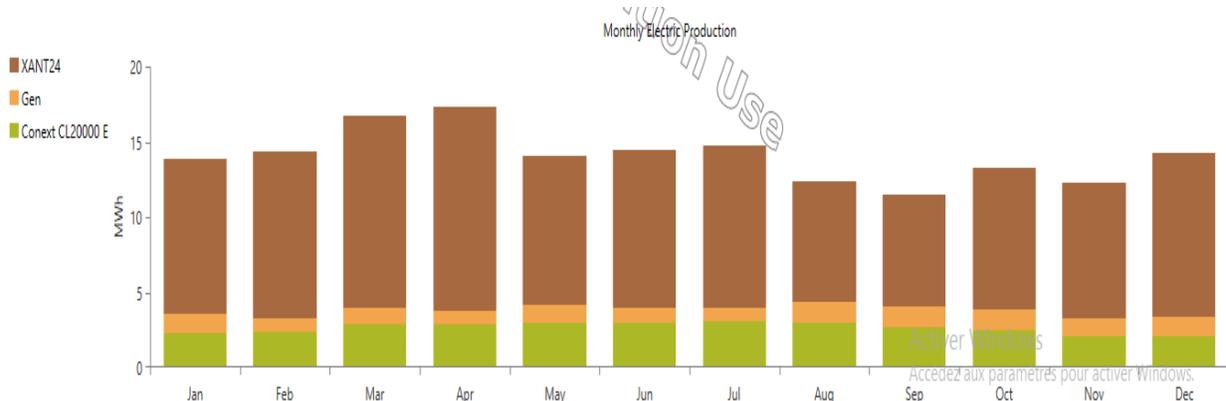


Figure V-21: Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source.

Nous remarquons qu'il y a une légère différence dans la production de l'énergie électrique entre certains mois de l'année, et que la puissance éolienne mensuelle moyenne produite est importante dans les deux mois les plus ventés (Mars, Avril). Aussi la puissance photovoltaïque mensuelle moyenne produite est importante dans les mois mars jusqu'à septembre.

V-5-4 Comparaison entre les deux systèmes:

Après l'analyse des résultats des deux configurations, il est certain que le recours à un système hybride présente un choix stratégique justifié sur les deux plans : économique et écologique.

- **Sur le plan économique :** Le tableau V-7 résume la comparaison des principaux paramètres économiques des deux configurations.

Paramètre	Système hybride	Système classique	Différence
Cons. de fuel (L/an)	5713	25007	-19294
Cons. Spécifique (L/kWh)	0.408	0.401	0.007
Coût spécifique (\$/kWh)	0.297	0.614	-0.317
Coût de l'installation (\$)	232069	480292	-248223

Tableau V-7: Comparaison entre les deux systèmes sur le plan économique.

Tous les paramètres du système hybride sont plus avantageux par rapport à ceux du système classique. Le coût spécifique de l'énergie pour le système classique est plus important par rapport au système hybride.

Nous avons déterminé le prix du kWh d'électricité fournit par le système hybride SEH et qui s'élève à 0.297\$/kWh avec un NPC= 232069\$ ce prix est inférieur on le comparant au prix du kilowattheure du GD qui s'élève à 0.614\$/kWh avec NPC= 480292\$.

- **Sur le plan écologique:**

Les émissions en gaz polluant de ce système hybride PV/éolien/diesel sont données par le tableau ci- dessous;

Polluant	Symbole	GD du système optimal (kg/an)	GD seul (kg/an)
Dioxyde de carbone	CO ₂	14955	65459
Monoxyde de carbone	CO	94.3	413
Hydrocarbures non brûlés	UHC	4.11	18
Particules	PM	0.571	2.5
Dioxyde sulfurique	SO ₂	36.6	160
Oxydes de nitrogène	NO _x	88.6	388

Tableau V-8: Quantité de gaz à effet de serre émise par le GD du système optimal et celle émise par le GD seul.

Les émissions de tous les gaz pour un système hybride sont beaucoup plus faibles par rapport à la seconde alternative (classique), en particulier les résultats obtenues mettent en évidence le rôle de l'utilisation des énergies renouvelables dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

N.B: dans notre étude; ces émissions ne sont pas prises en compte dans la procédure d'optimisation (la loi Algérie n'applique pas de pénalités pour ces émissions).

V-6 Conclusion:

Dans ce chapitre une brève description du système hybride de génération de l'énergie électrique est réalisée, les principales notions liées au type d'architecture de système ont été aussi présentés.

Une application du système hybride a été élaborée sur l'environnement HOMER pour une optimisation d'un système hybride à un site, où les données météorologiques comme la vitesse du vent sont disponibles. Nous a obtenu des résultats, sur la combinaison des sources d'énergie renouvelables.

En plus de la diversité des ressources énergétiques que présente un système hybride, la continuité et la disponibilité de la production d'énergie électrique est assurée.

Conclusion Générale

La ressource globale en énergie éolienne et photovoltaïque est très importante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité au niveau mondial.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque et de l'énergie éolienne en hybride.

Il s'agit de procéder à une étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien/Diesel en site isolé.

L'objectif étant de garantir l'efficacité énergétique de la chaîne de production, avec l'option du coût minimal.

La région en question possède un potentiel en énergie très important. La concrétisation de la configuration choisie à travers une étude de cas pour un site isolé à El Kheiter permet l'implémentation et la validation d'applications spécifiques tenant compte des spécificités du site.

En utilisant le modèle de simulation du logiciel HOMER, qui a un langage interactif, permettant la prédiction des tâches système d'une manière rapide et précise.

En résumé, on peut dire qu'avec une installation hybride et une bonne stratégie de contrôle on peut atteindre des objectifs principaux qui sont :

- Alimenter les charges électriques sans interruption.
- Maximiser l'utilisation des énergies renouvelables.
- Minimiser la consommation en combustible fossile.
- Protéger les composants du système donc prolonger leurs durée de vie.
- Réduire les émissions de tous les gaz.

Enfin, ce travail nous a permis de déterminer l'architecture optimale d'un système hybride (PV/éolien/diesel) en donnant à l'utilisateur les éléments nécessaires pour décider de l'approche qui conduit au meilleur compromis entre coûts et besoins.

Bibliographie

Ouvrages:

- [24] **B Multon, O Gergaud,** "Etat de l'art dans les aérogénérateurs", L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. Novelect - Ecrin, mai 2002, pp.97-154.
- [32] **J .L. Gary,** "Wind Energy Systems", Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov. 2001.
- [28] **M. Gapderou,** "Atlas Solaire de L'Algérie ", Tome, 2, OPU 1983.
- [33] **T.Burton,** "Wind energy handbook», Copyright 2001 by John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England.
- [13] **Y. Sukamongkol, S. Chungpaibulpatana et W. Ongsakul,** " A simulation model for predicting the performance of a solar photovoltaic system with alternating current loads", Renewable energy, 27, 2002.

Mémoires et Thèses:

- [8] **Allaoua Ferhat, Albane Amirouche,** " Etude et implémentation contrôle d'une stratégie de d'un système hybride (Photovoltaïque Diesel)", Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2011/2012.
- [19] **Baghdadi Fazia,** " Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 26 /09 /2011.
- [6] **Belabbas Arezki, Cherif Aghiles,**"Dimensionnement d'une Centrale Photovoltaïque Autonome de 16 kW", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 29 /09/ 2016.
- [21] **Benchiha Abdessamed, Elhacen Ould Abdallahie,**" Evaluation de la fiabilité d'un système de production hybride (éolienne- solaire)", Mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda ,2012/2013.
- [20] **Borni Abdelhalim,** " Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique", Thèse de Doctorat, Université Constantine 1, 12 / 03 / 2015.
- [9] **Boukhers Djamil,**"Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage", Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 28 / 11 / 2007.

Bibliographie

- [36] **Boudahra Hamidou, Berrahou Cheikh,** " Etude et simulation d'un système hybride (diesel et éolien)", Mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2016-2017.
- [5] **Bounaceur Amin,** "Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie", Mémoire de Master, Université kasdi-merbah Ouargla, 2014-2015.
- [11] **Brihmat Fouzia,** " Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 03/07/2012.
- [7] **Ferrah Billel,** " Etude d'un système Hybride (photovoltaïque –éolien)", Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014/2015.
- [27] **Hadj Belkacemi Mohammed,** " Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé", Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, 06 juillet 2011.
- [16] **Hassad Mohamed Amine,** " Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques", Mémoire de Magister, Université Sétif 1, 2012.
- [14] **Hassini Née, Belghitri Houda,** " Modélisation, Simulation et optimisation d'un système hybride éolien-Photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.
- [26] **I Kamwa, B Saulier,** "Modélisation, simulation et régulation d'un réseau éolien/diesel autonome", Rapport N°IREQ4340, Varennes, Canada, 1989.
- [23] **I Vechiu,** "Modélisation et Analyse de L'intégration des Energies Renouvelables dans un Réseau Autonome", Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2005.
- [18] **J F Manwell, A Rogers, G Hayman, C T Avelar et J G Mcgowan,** "Hybrid2- A hybrid system simulation model," Theory manual, NREL Subcontract XL-11126-1-1, University of Massachusetts, 1998.
- [10] **Kara Abdelfattah,** " Dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie", Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas –Setif1, 24/06/2014.
- [2] **Kernif Hakim, Mebarki Amel,** "Contribution à l'amélioration des performances d'un système d'énergie hybride (éolien photovoltaïque)", Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2016/2017.
- [17] **Khelladi Smaine,** " Analyse et approche d'aide a la décision pour le choix d'un projet éolien" , Mémoire de Magister, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2009/2010.

Bibliographie

[31] **Latreche Mohammed Tahar**, " Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 24 /06 /2012.

[37] **Loumi Maya, Hamitouche Salma**, " Étude et simulation d'un jumelage éolien-diesel sous HOMER", Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2018.

[22] **Ludmil Stoyanov**, " Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables", Thèse de Doctorat, Université technique de Sofia, 28 octobre 2011.

[3] **Sadaoui Elias, Meddouri Mustapha**, "Gestion d'énergie dans un système hybride (Photovoltaïque – Eolien)", Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2012.

[4] **Sadi Mohammed El Amine, Hamlat Zohra**, "L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220 KV", Mémoire de Licence, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2013-2014.

[15] **Sadkine Smail, Rachedi Aghiles**, " Etude d'un système éolien connecté au réseau, basé sur une GAS auto-excitée", Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2016/2017.

[1] **Salim Arab, Dalila Toudert**, " Etude d'un Système Photovoltaïque, Recherche Scientifique", Mémoire de Master, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 25/09/ 2017.

[35] **Tammam Basbous**, " Etude de faisabilité d'un jumelage éolien — diesel avec stockage d'énergie sous forme d'air comprimé", Mémoire de Recherche, Université Du Québec à Rimouski, Février 2009.

[13] **Y. Sukamongkol, S. Chungpaibulpatana et W. Ongsakul**, " A simulation model for predicting the performance of a solar photovoltaic system with alternating current loads", Renewable energy, 27, 2002.

[12] **Y. Pankow**, " Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau BT. Application au GPV", Thèse de Doctorat, Centre National de Recherche Technologique de Lille, Décembre 2004.

Site web:

[25] <http://www.dewi.de>, Site Internet de l'institut allemand DEWI.

[34] <http://www.hellopro.fr>.

[29] <http://www.windpower.org>, Danish Wind Industry Association.

[28] www.edisud.com **G.Cunty**, " Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne", Edissud, Aixen-Provence, 2001.