

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMEDES



Faculté des Sciences de L'Ingénieur

Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER**

Filière :Energies renouvelables

Option :Energies renouvelables en mécanique

THEME

*Etude d'hybridation de l'aéroport d'Alger par
le système PV-Diesel*

Présenté par :

-MEGHOUCHE Naima

-ZIKARA SALIHA

Promotrice : M^{me} R.DOUMANE

Co-promoteur : M^{me} F.BEN MELOUD

Promotion 2017-2018

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre sympathie envers toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenus.

Nous aimerions tout d'abord remercier nos parents qui nous ont toujours poussés à aller plus loin.

Nous remercions particulièrement notre enseignant et promoteur Madame **DOMAINE RADIA** ainsi que notre encadreur Madame **BEN MILOUDE FATIHA** pour leurs orientations et ses conseils éclairés mais également pour leurs encouragements qui nous ont fortement réconfortées dans les moments de doutes.

Nos plus vifs remerciements sont également adressés à messieurs les membres du jury d'avoir participé à examiner notre travail.

Nous remercions nos magnifiques amis et tous ceux qui ont contribué à faire en sorte que notre travail soit mené à terme.

Résumé

Les préoccupations croissantes sur l'environnement après le Protocole de Kyoto ont encouragé l'exploitation des ressources renouvelables propres et inépuisables. La production de l'énergie par des ressources renouvelables est principalement mise en œuvre pour alimenter les zones rurales éloignées.

Pour ces régions, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement. Cependant, et pour pallier ces problèmes les travaux de recherche ont été orientés vers le concept des systèmes hybrides de génération d'énergie électrique.

L'objectif principal de ce travail est l'étude et la simulation d'un système hybride PV-Diesel qui répond à nos besoins énergétiques afin de réduire les émissions des gaz à effet de serre.

Les résultats de simulation obtenus, par HOMAR, montrent la souplesse du système proposé face aux variations de la charge tout en minimisant les émissions des gaz à effet de serre.

SOMMAIRE

Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralité sur la situation énergétique

1 INTRODUCTION 3

2 Les énergies renouvelables 3

 2.1 Production de l'énergie électrique d'origine hydraulique 4

 2.2 Production de l'énergie électrique d'origine géothermique 4

 2.3 Production de l'énergie électrique d'origine biomasse 4

 2.4 Production de l'énergie électrique d'origine marine 5

 2.5 Production de l'énergie électrique d'origine éolienne..... 5

 2.6 Production de l'énergie électrique d'origine solaire..... 5

3 Le rayonnement solaire..... 5

4 Composants du rayonnement solaire 7

5 Le contexte énergétique mondial 8

6 Potentiel énergétique en Algérie 9

7 Le gisement solaire en Algérie 11

 8 Nouveau programme national de développement des énergies renouvelables (2015 - 2030)..... 12

9 Conclusion 14

Chapitre II : Etat de l'art sur le système d'énergie hybride

1 Introduction..... 15

2 Définition des systèmes hybrides..... 15

3 Présentation d'un système systèmes hybrides PV/ Groupe électrogène..... 16

 3.1 Définition..... 16

 3.2 Intérêt des systèmes hybrides 16

Sommaire

4	Classification des systèmes hybrides	17
4.1	Le régime du fonctionnement.....	17
4.2	La structure du système hybride	17
5	Les différentes configurations des systèmes photovoltaïques hybrides	18
5.1	Configuration série	19
5.2	Configuration commutée	20
5.3	Configuration parallèle	21
6	Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïques-diesel	23
6.1	Généralité sur les systèmes photovoltaïques	23
6.1.1	Énergie solaire photovoltaïque	23
6.1.2	Effet photovoltaïque.....	23
6.1.3	Générateur photovoltaïque.....	24
6.1.4	Les technologies des cellules photovoltaïques	25
6.1.4.1	La Silicium cristallin	26
6.1.4.2	Silicium amorphe.....	26
6.1.4.3	Les couches minces (Composites (CIS, CGIS et CdTe)).....	27
6.1.4.4	Cellules organiques.....	27
6.1.5	Caractéristiques des cellules photovoltaïques.....	28
6.1.6	Les équipements d'un système photovoltaïque	29
6.2	Généralité sur les générateurs diesel	31
6.2.1	Définition des générateurs diesel	31
6.2.2	Les différents composants d'un générateur diesel	31
6.2.3	Le principe de fonctionnement	32
7	Architecture d'un système d'énergie hybride	32
7.1	Architecture à bus à CC.....	33
7.2	Architecture à bus à CA.....	34
7.3	Architecture mixte à bus à CC/CA	35

Sommaire

8	Coûts intervenant dans l'hybridation des systèmes	36
8.1	Coût d'investissement.....	36
8.2	Coût de fonctionnement.....	37
9	Avantages et enjeux du système hybride	38
9.1	Avantages	38
9.2	Enjeux.....	38
10	Conclusion.....	38

Chapitre III : design et dimensionnement du système PV-diesel

1	Introduction.....	39
2	Présentation du logiciel Homer.....	39
3	Fonctionnement de Homer.....	39
4	Création du système hybride.....	40
5	Présentation de l'Aréport Houari Boumediene :.....	41
6	Caractéristique de la région de Dar El Beida.....	42
6.1	Données géographiques	42
7	Données météorologiques.....	43
7.1	Variation mensuelle de l'irradiation	43
7.2	Données de la température	44
8	Profils de la charge de l'aéroport.....	46
9	Caractéristiques techniques des composants utilisés	47
9.1	Choix du panneau photovoltaïque	47
9.1.1	Choix de l'inclinaison	47
9.1.2	Choix de l'orientation	48
10	Caractéristiques du panneau photovoltaïque	48

Sommaire

11	Caractéristiques des batteries	49
12	Caractéristiques du convertisseur	49
13	Caractéristiques du groupe diesel	49
14	Optimisation du système.....	49
15	Conclusion	50

Chapitre IV simulation et résultat

1	<i>Introduction.....</i>	51
2	<i>La configuration du système</i>	51
2.1	<i>Le Scénario 1 : Groupe diesel seul isolé du réseau et sans stockage</i>	51
2.1.1	<i>Système optimale</i>	52
2.1.2	<i>Production électrique mensuelle moyenne</i>	52
2.1.3	<i>Coût du système</i>	52
2.2	<i>Scénario 2: générateur PV-Diesel isolé du réseau et sans stockage</i>	54
2.2.1	<i>Système optimale :</i>	54
2.2.2	<i>Production électrique mensuelle moyenne</i>	54
2.2.3	<i>Coût du système</i>	55
2.3	<i>Scénario3: générateur PV-Diesel isolé du réseau et avec stockage</i>	56
2.3.1	<i>Système optimale</i>	57
2.3.2	<i>Production électrique mensuelle moyenne</i>	57
2.3.3	<i>Coût du système</i>	57
3	<i>Comparaison entre les quatre configurations</i>	59
3.1	<i>Du côté économique</i>	59
3.2	<i>Du côté écologique</i>	60
4	<i>Comparaison des profils de fonctionnement.....</i>	65
4.1	<i>Pour le système hybride.....</i>	65

Sommaire

4.2	<i>Pour le groupe diesel seul</i>	69
5	<i>Détermination du nombre de panneaux</i>	70
5.1	<i>Choix des batteries</i>	71
	Conclusion générale.....	72

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur la situation énergétique

Figure 1 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de convection AM	6
Figure 2 spectres solaires relevés dans plusieurs condition selon la convection AM.....	6
Figure 3 composantes du rayonnement solaire au sol.....	7
Figure 4 Consommation énergétique annuelle mondiale.....	8
Figure 5 évolution de la demande d'énergie dans le monde (source AIE,2007).....	8
Figure 6 Répartition du rayonnement solaire sur le globe terrestre (source AIE, 2004).	10
Figure 7 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné a la latitude de lieu.	11
Figure 8 Les ratios du potentiel solaire de l'Algérie par rapport aux pays de l'Afrique du Nord, moyens orientes et l'Europe de Sud	12

Chapitre II : Etat de l'art sur le système d'énergie hybride

Figure 1 Système d'énergie hybride photovoltaïque-groupe électrogène.	17
Figure 2 Classification des systèmes	18
Figure 3 système hybride PV-Diesel série.	19
Figure 4 Système hybride PV-Diesel commuté.	21
Figure 5 Système hybride PV-Diesel parallèle.	22
Figure 6 1-Cellule PV 2- Panneau PV 3-Champ PV.	23
Figure 7 Schéma descriptif d'une cellule photovoltaïque.....	25
Figure 8 Les ratios d'utilisations des technologies des cellules photovoltaïque.	25
Figure 9 Cellules monocristalline et poly-cristalline.	26
Figure 10 Module en silicium amorphe.	27
Figure 11 Modules PV en couche mince.	27
Figure 12 Caractéristique I(V) et P (V) d'un module solaire.	28
Figure 13 Caractéristiques I-V d'un panneau PV.	29
Figure 14 Schéma d'un système photovoltaïque.	30
Figure 15 Les éléments constitutifs d'un générateur diesel.....	32
Figure 16 Architecture des SEH.....	33

Figure 17 Architecture a bus a CC.	34
Figure 18 Architecture à bus à CA.....	35
Figure 19 Architecture mixte a bus CC/CA.	36

Chapitre III : design et dimensionnement du système PV-diesel

Figure 1 Interface de Homer (Équipement à choisir).....	40
Figure 2 Nouvelle aérogare de l'aéroport.....	41
Figure 3 Situation géographique de Dar El-Beida –Alger	42
Figure 4 Température mensuelle moyenne d'Alger.....	45
Figure 5 profile de la consommation journalière (KW/h).....	46
Figure 6 Evolution mensuelle de la consommation électrique pour nouvelle Aéroport d'Alger.....	47

Chapitre IV : simulation et résultat

Figure 1 Schémas des composants de la 1ème configuration	51
Figure 2 Production électrique moyenne mensuelle	52
Figure 3 Répartition du coût total du projet	53
Figure 4 Schéma des comportements de la 1ère configuration.....	54
Figure 5 Répartition de la production d'électricité moyenne mensuelle.....	55
Figure 6 Répartition du coût total du projet	55
Figure 7 Schéma des comportements de la 4ème configuration.....	56
Figure 8 : Production électrique moyenne mensuelle	57
Figure 9 Répartition du coût total du projet	58
Figure 10 Comparaison des coûts totaux des quatre systèmes.....	59
Figure 11 Comparaison des quantités des émissions totales pour chaque système	61
Figure 12 Comparaison des quantités des émissions de co2 créé par chaque système.....	61
Figure 13 Comparaison des quantités de monoxyde de carbone pour chaque système.....	62
Figure 14 Comparaison des quantités des émissions des hydrocarbures imbrûlés pour chaque système	62
Figure 15 Comparaison des quantités des émissions des matières particulières pour chaque système	63
Figure 16 Comparaison des quantités des émissions du dioxyde de soufre pour chaque système	63

Figure 17 Comparaison des quantités des émissions d'oxyde d'azote pour chaque système..	64
Figure 18 Production journalière du générateur photovoltaïque pour toute l'année.....	65
Figure 19 valeur mensuelle	65
Figure 20 rayonnement solaire incident	66
Figure 21 rayonnement solaire	66
Figure 22 Température aumbiant	67
Figure 23 Production de générateur PV de 5000Kw (valeurs horaires).....	67
Figure 24 Production de GE de 5000Kw (valeurs horaires)	68
Figure 25 production de Groupe Diesel	69
Figure 26 Production journalières du groupe diesel pour toute l'année.....	69

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralité sur la situation énergétique

Tableau 1 Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques 11

Chapitre II : Etat de l'art sur le système d'énergie hybride

Tableau 1 Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques [36].....28

Chapitre III : design et dimensionnement du système PV-diesel

Tableau 1 Caractéristiques géographiques du la station météorologique d'Alger 42
Tableau 2 Evolution de l'ensoleillement mensuelle de la région d'Alger. 43
Tableau 3 Données du rayonnement solaire de la région d'Alger 44
Tableau 4 La température mensuelle d'Alger 45
Tableau 5 Caractéristiques du panneau solaire 48
Tableau 6 Caractéristiques de la batterie..... 49

Chapitre IV : simulation et résultat

Tableau 1 Le système optimal des configurations de 1ème scénario. 52
Tableau 2 Résultats de la simulation de la 1ème configuration 53
Tableau 3 Le système optimal des configurations de 1er scénario. 54
Tableau 4 Résultats de la simulation de la 2ème configuration 56
Tableau 5 Le système optimal des configurations de 4ém scénario. 57
Tableau 6 Résultats de la simulation de la 4ème configuration. 58
Tableau 7 Les coûts de chaque système 59
Tableau 8 Les polluants créent par les trois systèmes..... 60
Tableau 9 Caractéristiques techniques du deuxième panneau 70
Tableau 10 Tableau comparatif entre les trois types des modules 71
Tableau 11 Caractéristiques des batteries Hoppecke 20 OPzS 2500. 72

AM : Air Mass

AIE : Agence Internationale de l'Énergie

ASA : Agence Spatiale Allemande

O.N.M : Office National de Météorologique

CSP : solaire thermique

FNERC : Fonds National des Energies Renouvelables et Cogénération

SH : Système Hybride.

SEH : Système d'Energie Hybride

MPPT : Point Maximum de Puissance

E_{ph} : Énergie du photon (en joule)

λ_0 : la longueur d'onde (m)

h : la constante de Planck ($6.626 \cdot 10^{-34}$ J. s)

c : la vitesse de la lumière. ($3 \cdot 10^8$ m/s)

CIS : Cuivre Indium Sélénium

CdTe : Tellure de Cadmium

CIS : Séléniure de Cuivre et d'Indium

CIGS : Séléniure de Cuivre et d'Indium et de Gallium

I(V) : courant-tension

I_{sc} : courant de court-circuit

V_{oc} : tension du circuit ouvert

PV: L'énergie solaire photovoltaïque

GPV: Générateur Photovoltaïque

PPM: Point De Puissance Maximale

CC: Le Courant Continu

CA: Le Courant Alternatif

GE : Groupe Electrogène

GD : Groupe Diesel

Coût_{invcomp k} : Coût d'investissement du composant k

Coût_{recup groupes} : Coût des groupes électrogènes récupérés

N_{comp-1} : Nombre de composants du système sans compter les groupes diesel

Coût_{remplcomp k} : Les coûts de remplacement

Coût_{emhyb} : Les coûts d'entretien et de maintenance

CO₂ : Dioxide de Carbone

Présentation de l'entreprise



مركز البحث والتطوير للكهرباء والغاز

Centre de Recherche et de Développement de l'Electricité et du Gaz

Le CREDEG

Centre de recherche de développement de l'électricité et du gaz, créé le premier janvier 2005 comme filiale de la Sonelgaz. Sa principale mission est la recherche appliquée et le développement technologique, l'expertise des éléments industriels et l'analyse des comportements des équipements et des matériaux en phase d'exploitation et de fabrication.

Les objectifs ciblés

- L'amélioration continue des performances techniques des installations par développement de solutions novatrices et adaptées aux problèmes techniques inhérents aux activités des métiers de Sonelgaz.
- la sécurité des personnes et des biens.
- la protection de l'environnement.

Les secteurs d'activités

Secteur de l'agriculture, secteur des eaux, secteur de l'habitat et de la construction, secteur d'énergie (électricité et gaz naturel).

Les laboratoires de recherches

Laboratoire de métrologie, Laboratoire de polyéthylène, Laboratoire Physico-chimique, Laboratoire de protection électrique, Laboratoire de métallurgie, Laboratoire d'essais électrotechnique.

Les énergies renouvelables

- Eolien, Photovoltaïque et Solaire thermique étude de faisabilité et d'amélioration de rendement.
- Stockage et régulation.
- Guide technique pour l'utilisation du photovoltaïque.
- Réalisation du programme de l'électrification à l'énergie photovoltaïque de 18 villages du sud Algérie.
- laboratoire de centrale électrique.



Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés.

Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles.

Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables.

En ce qui concerne notre pays : l'Algérie, l'enjeu du développement des énergies renouvelables est encore plus important. En effet, ces énergies permettront de plus en plus de couvrir la croissance nécessaire et légitime des services énergétiques de base dans les domaines du développement rural, de l'habitat, de la santé, de l'éducation puis à long terme, de l'industrie.

Tandis que l'énergie solaire qui représente un potentiel important à la région d'Algérie donne une autre extension pour notre pays pour se diversifier au point de production d'électricité d'origine renouvelable dans la décennie à venir.

De l'investissement d'une installation de production d'énergie électrique à partir du rayonnement solaire.

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, ces un énergies ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ce source d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles.

Deux méthodes sont développées pour ce type de système. La première est basée sur la moyenne des valeurs mensuelles annuelles dans laquelle la taille des générateurs photovoltaïque est déterminée à partir des valeurs moyennes mensuelles des contributions de

chaque composant. Dans la seconde méthode, la détermination des tailles de ce composant du système est basée sur le mois le plus défavorable.

Pour atteindre cet objectif, nous avons scindé notre mémoire en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente les différentes ressources énergétiques renouvelables existantes, et la généralité sur la situation énergétique de l'énergie électrique. Enfin, nous finirons ce chapitre par la situation énergétique en Algérie.
- Le deuxième chapitre est consacré à une étude l'état de l'are et justifie les différentes composantes du système hybride photovoltaïque-GE
- Le troisième chapitre présente le design et les modèles utilisées dans le dimensionnement de notre système. A cette fin les potentiels solaires sont évalués en tenant compte des paramètres astronomiques et météorologiques.
- Le quatrième chapitre est à présenter les résultats de la simulation par HOMER et la comparaison entre les différents scénarios des résultats.

Finalement, on termine par une conclusion générale, on rappellera les principaux résultats obtenus et on donnera les éventuelles perspectives.

CHAPITRE I

Généralité sur la situation énergétique

1 INTRODUCTION

Des activités énergétiques humaines doivent actuellement faire face à un double défi. D'une part, les ressources énergétiques fossiles ne pourront répondre indéfiniment à la demande, ce qui impose d'envisager de nouveaux moyens de productions d'énergie permettant de répondre aux besoins énergétiques des générations futures. D'autre part, les émissions anthropique de gaz à effet de serre, tel que le gaz carbonique ou de déchets radioactifs, causées par nos activités énergétiques sont des responsables majeurs du changement climatiques [1].

L'utilisation de sources propres et renouvelables semble apporter une réponse convaincante mais partielle au problème énergétique actuel. Cependant, le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ce système pour les exploiter au mieux. De nos jours, l'intégration de ces ressources avec les systèmes de production électricités par voie fossile est favorisés favoriser surtout dans les systèmes isolés se fait en association avec l'utilisation de ressources conventionnelles telles que les générateurs diesel 'ajout d'un dispositif de stockage d'énergie est parfois nécessaire pour assurer la continuité de la fourniture électrique à l'utilisateur, quand la ressource renouvelable ne peut le faire [2].

Ce chapitre présente des formes d'énergies les plus consommées au monde. Il introduit la problématique de la production d'électricité pour l'habitat.

Il établit la prévision et la production mondiale de l'énergie électrique. Enfin, nous finirons ce chapitre par la situation énergétique en Algérie.

2 Les énergies renouvelables

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisable à l'échelle humaine, largement disponible, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur.

Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. Ces atouts, alliés à des technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies

renouvelables mais de manière encore très inégale selon le type de ressources considérées.

La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche.

Ces dernières années, la demande mondiale en énergie a atteint un seuil préoccupant pour un grand nombre de pays. L'épuisement annoncé des réserves pétrolières par les spécialistes et les changements climatiques dus aux gaz à effet de serre ont incité la communauté internationale à s'orienter vers les énergies renouvelables notamment.

Le développement des énergies renouvelables connaît un succès sans précédent et se traduit par l'installation de multiples systèmes renouvelables dans le monde entier.

2.1 Production de l'énergie électrique d'origine hydraulique

Le principe de l'hydroélectricité est d'utiliser la force de l'eau créée grâce à une hauteur de chute pour qu'elle entraîne une turbine reliée à un générateur d'électricité. Certains barrages hydroélectriques sont équipés d'une centrale de pompage-turbinage [3]

2.2 Production de l'énergie électrique d'origine géothermique

La production d'électricité géothermique consiste à convertir la chaleur des nappes aquifères haute température (de 150 à 350°C) à l'aide de turboalternateurs. Une autre technologie est actuellement en cours de développement. Elle consiste à utiliser la fracturation naturelle des roches profondes dont la température avoisine 200°C à 5000 m de profondeur [3].

2.3 Production de l'énergie électrique d'origine biomasse

On peut produire de l'électricité avec de la biomasse et la meilleure façon de la faire est d'utiliser un dispositif de cogénération qui permette également d'exploiter la chaleur produite.

Des recherches sont menées actuellement sur la gazéification et la pyrolyse de la biomasse. Elles ont pour objectif d'aboutir à des centrales des fortes puissances et à haut rendement pour produire de l'énergie électrique [4].

2.4 Production de l'énergie électrique d'origine marine

Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en énergie électrique [4].

Une autre façon de récupérer de l'énergie de la mer est la production grâce à la marée qui est due à l'action de la lune sur les eaux

2.5 Production de l'énergie électrique d'origine éolienne

Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en électricité ou en d'autres formes d'énergie. Une éolienne utilise la force du vent pour actionner les pales d'un rotor. L'énergie mécanique produite par la rotation des pâles est transformée en énergie électrique grâce une génératrice.

2.6 Production de l'énergie électrique d'origine solaire

La production d'électricité solaire repose sur deux technologies bien distinctes. La technologie des modules photovoltaïques utilise une des propriétés des semi-conducteurs qui, au contact de la lumière, génèrent un courant électrique. La seconde technologie est celle des centrales hélios thermodynamiques .Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de miroir sur un point focal afin d'obtenir des températures très élevées (de 400 à 1000°C) qui permettent la production de vapeur d'eau et donc d'électricité. Ces centrales sont la plupart du temps hybrides [3].

3 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 μ m) à l'infrarouge lointain (2.5 μ m). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m² (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Figure 1).

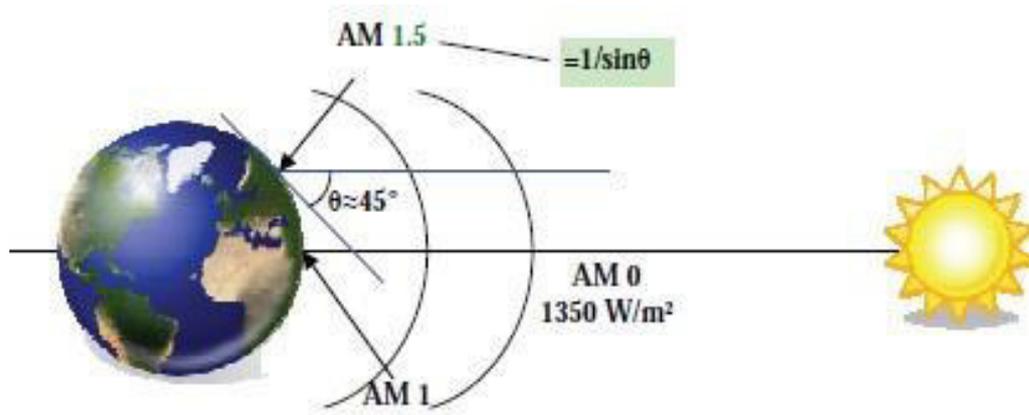


Figure 1 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de convection AM [5].

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m^2 du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m^2 (AM1.5) [5].

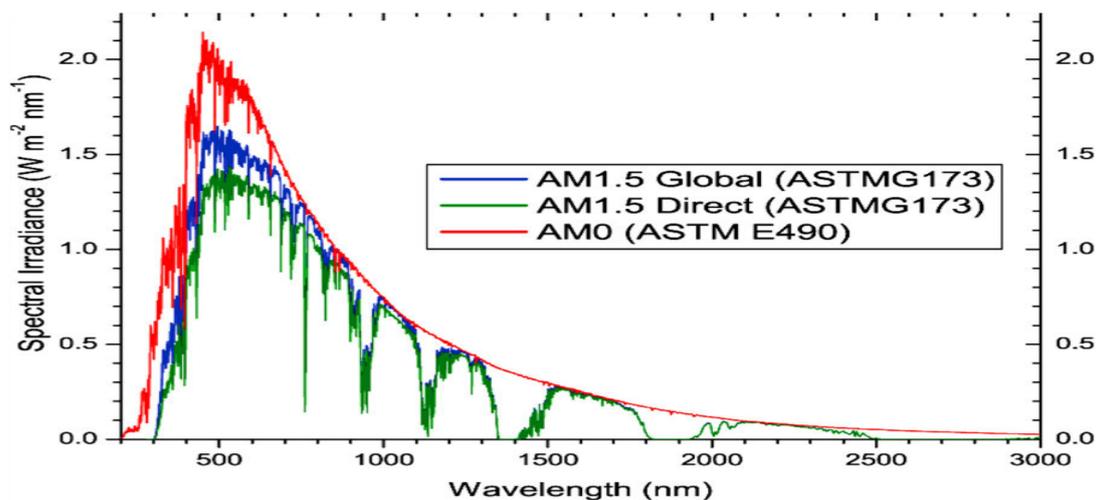


Figure 2 spectres solaires relevés dans plusieurs condition selon la convection AM.

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m^2 (Figure I.2) [5].

4 Composants du rayonnement solaire

- **Direct** : c'est le rayonnement reçu directement du Soleil au sol sans subir des modifications [6].
- **Diffus** : c'est celui qui est renvoyé dans toutes les directions. Le phénomène de diffusion se produit dans un milieu de fines particules considérées [7].
- **Réfléchi** : c'est le rayonnement renvoyé dans une direction privilégiée ou de manière diffuse. Est dépend de l'environnement du site. Le rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement incident est dit l'albédo. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés [8].
- **Global** : est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La figure(I.3) illustre les différents composants du rayonnement solaire au niveau du sol [7].

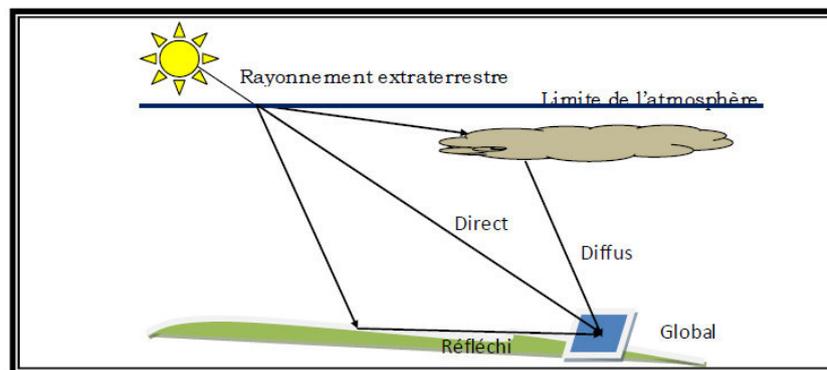


Figure 3 composantes du rayonnement solaire au sol.

5 Le contexte énergétique mondial

Le XXI^e siècle sera un siècle de transition énergétique [9]. L'ensemble des experts spécialisés dans le domaine de l'énergie, s'accorde à le concevoir. Une transition entre: la situation actuelle, où les hydrocarbures (notamment le pétrole) tiennent une place prépondérante dans la consommation énergétique (Figure I.4) particulièrement dans les transports, et un futur proche, où d'autres sources d'énergie (énergies renouvelables) viendront progressivement prendre le relais. Cette transition doit se concevoir dans une logique de développement durable, tant du point de vue de la préservation de l'environnement que de la pérennité des sources d'approvisionnement.

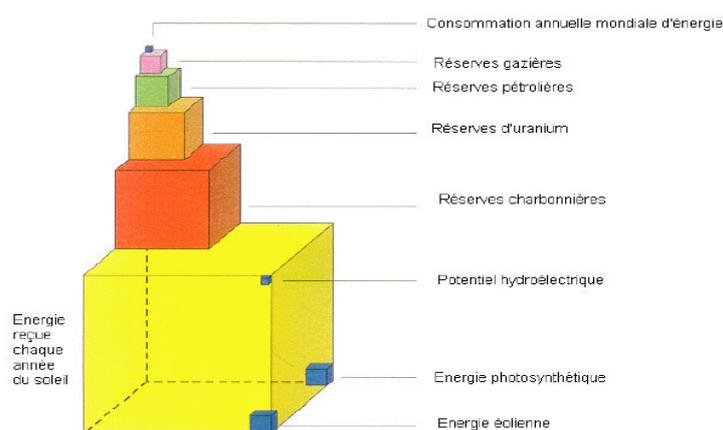


Figure 4 Consommation énergétique annuelle mondiale.

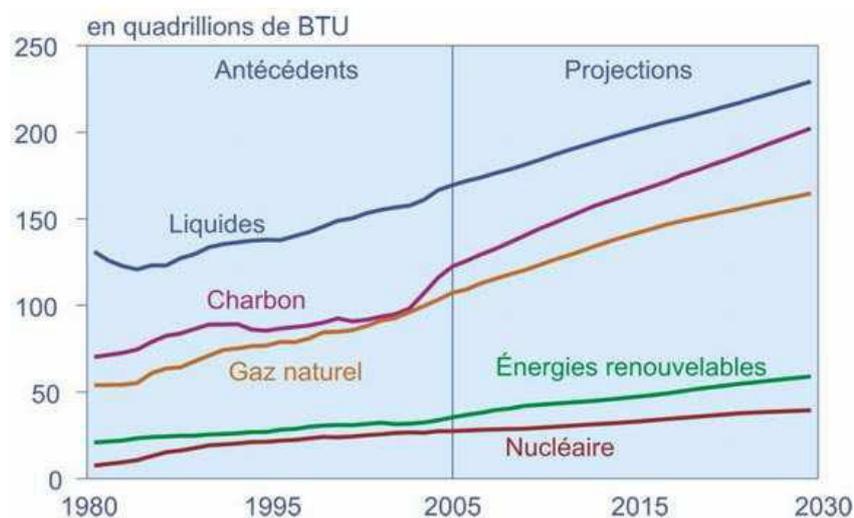


Figure 5 évolution de la demande d'énergie dans le monde (source AIE,2007).

Actuellement est marquée par la demande énergétique mondiale devrait inévitablement progresser, en raison de la croissance démographique et économique, notamment dans les pays en voie de développement. Selon le scénario de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), la

demande mondiale en énergie primaire pourrait atteindre 17Gtep (Gigatonnes équivalent pétrole) en 2030 (Figure I.5), Cela représente un taux de croissance moyen de 1,6 % par an sur les 20 prochaines années [10]. De plus les ressources en énergies fossiles ne sont pas inépuisables. Les progrès technologiques ont permis et permettront encore de repousser les limites des réserves. Mais l'horizon d'un plafonnement de la production, puis d'une raréfaction du pétrole doit cependant être dès aujourd'hui pris en compte, même si la date du "pic pétrolier" reste incertaine. Enfin, aucune politique économique et énergétique ne peut ignorer enjeu climatique, dû aux émissions de gaz à effet de serre. Même si la prise de conscience de ce phénomène peut sembler lente au regard des enjeux pour la planète, elle est néanmoins réelle et de plus en plus forte.

Le développement économique et la consommation d'énergie qui en résulte doivent aujourd'hui intégrer cette question du dérèglement climatique (Figure I.5) Cela concerne tout d'abord le secteur énergétique, responsable aujourd'hui d'environ 65 % des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique [11].

6 Potentiel énergétique en Algérie

Dans un contexte de relance économique, la demande d'énergie en Algérie peut doubler entre 2000 et 2020 et atteindre 60 à 70 millions de tep. Le potentiel cumulé d'économie d'énergie, pour cette même période, se situerait autour de 120 millions de tep. C'est pourquoi, à partir de 2001, l'Algérie, pays exportateur de pétrole et de gaz, a mis en place une stratégie nationale de maîtrise de l'énergie adaptée à un contexte d'économie de marché. Il est intervenu à un moment clé de l'évolution du paysage énergétique algérien caractérisé notamment par : la transition de l'ensemble du pays vers une économie de marché avec pour conséquence l'engagement de réformes importantes dans le secteur de l'énergie et la nécessité d'adapter le cadre de la maîtrise de l'énergie au nouveau contexte économique et politique; une croissance de l'ensemble des secteurs consommateurs ayant un fort impact sur la demande d'énergie, des capacités de raffinage proches de la saturation et une offre d'électricité parfois dépassée lors des pointes de consommation. La définition d'une stratégie nationale et la mise en œuvre opérationnelle des différents outils, organismes et instruments prévus par la loi de juillet 1999 sur la maîtrise de l'énergie [12]. L'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen (Figure I.6) et ambitionne de produire 5% de son électricité à partir de l'énergie solaire en 2015. Notre pays dispose d'une énergie thermo-solaire de plus de 169,44TWh par an et de plus de 13,90TWh/an d'énergie photovoltaïque. La consommation actuelle de l'Algérie en énergie obtenue essentiellement du gaz et du pétrole, est de 25 à 30TWh

par an. Notre pays compte se tourner vers les énergies renouvelables afin d'économiser ses ressources en hydrocarbures dans un cadre de développement durable.

Pour saisir la portée des énergies renouvelables en Algérie et les enjeux considérables qu'elles sous-entendent, il convient tout d'abord de rappeler les ressources considérables et inépuisables existantes de ces énergies non encore exploitées ; à savoir le gisement solaire exceptionnel qui couvre une superficie de 2.381.745 Km², avec plus de 3000 heures d'ensoleillement par an aussi l'existence d'un potentiel énergétique appréciable éolien et géothermique facilement mobilisable.

Ces énergies sont pour l'avenir de l'Algérie des zones rural et contre leur isolement pour la santé et l'alimentation en eau, contre la déforestation et pour les télécommunications. Ce qui induit la stabilisation des populations sur leurs lieux d'origine avec des perspectives prometteuses quant à leurs conditions de vie.

L'engagement de notre pays dans la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable est fortement confirmé pour l'exploitation de ces ressources naturelles renouvelables et non polluantes, grâce à une mobilisation accrue des efforts de recherche/développement pour la maîtrise des technologies mises en œuvre dans les installations de conversion des énergies renouvelables de puissance [13].

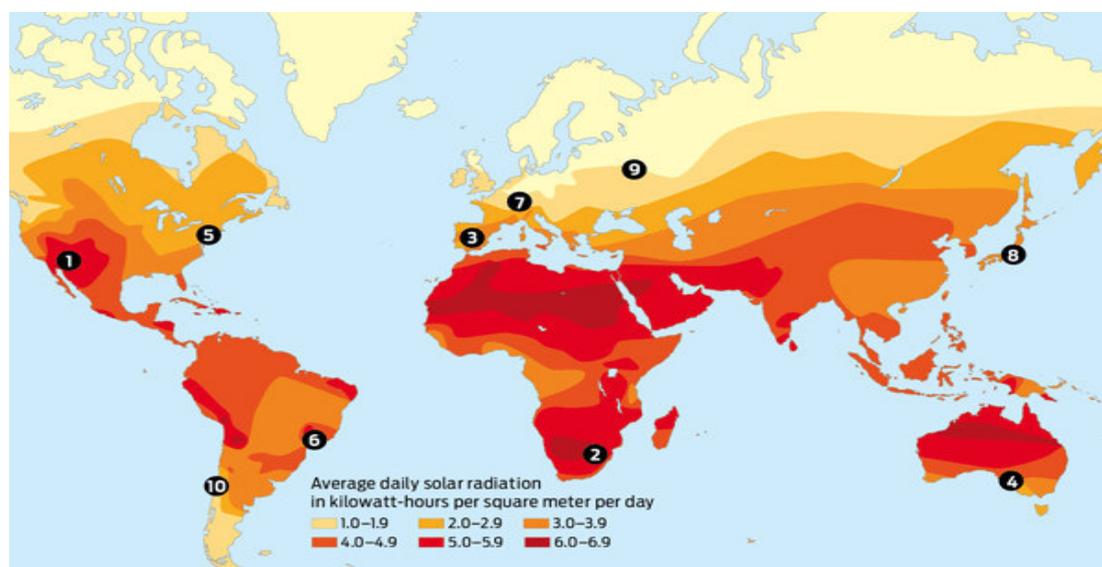


Figure 6 Répartition du rayonnement solaire sur le globe terrestre (source AIE, 2004).

7 Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement Solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

D'autre part la situation géographique de l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme. Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique et 13.9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au Niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau (I.1) Selon l'ensoleillement reçu annuellement:

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau 1 Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [14].

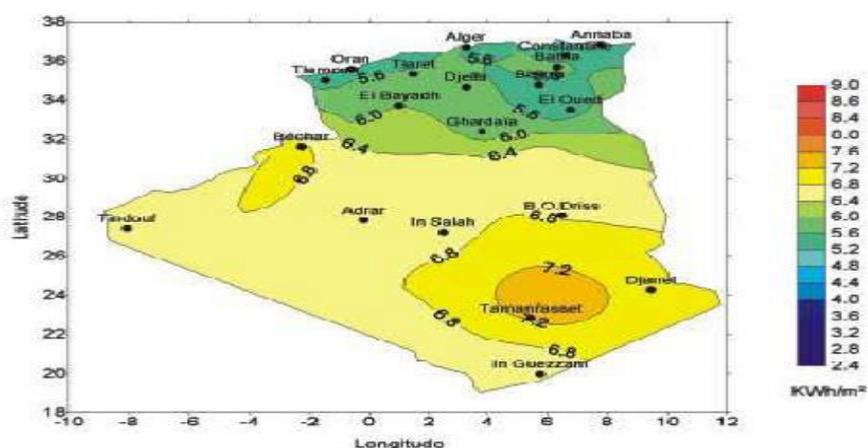


Figure 7 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude de lieu.

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M réparties sur tout le territoire algérien. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations.

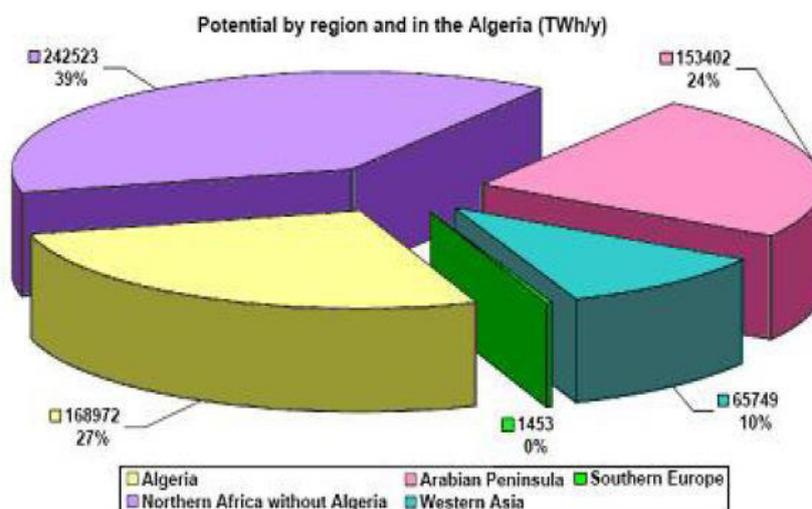


Figure 8 Les ratios du potentiel solaire de l'Algérie par rapport aux pays de l'Afrique du Nord, moyens orientés et l'Europe de Sud

8 Nouveau programme national de développement des énergies renouvelables (2015 - 2030)

Le programme national de développement des énergies renouvelables dans sa version actualisée par les services du ministère de l'énergie vient d'être adopté par le gouvernement.

En effet, l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique national constitue un enjeu majeur dans la perspective de préservation des ressources fossiles, de diversification des filières de production de l'électricité et de contribution au développement durable.

A la faveur du programme de développement des énergies renouvelables 2011-2030 adopté par le Gouvernement en février 2011, les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par l'Algérie.

Ce programme a connu une première phase consacrée à la réalisation de projets pilotes et de tests des différentes technologies disponibles, durant laquelle des éléments pertinents concernant les évolutions technologiques des filières considérées sont apparus sur la scène énergétique et ont conduit à la révision de ce programme.

Parmi ces éléments nouveaux, il convient de citer : une meilleure connaissance du potentiel national en énergies renouvelables, notamment pour le solaire et l'éolien, suite aux études engagées ; la baisse des coûts des filières photovoltaïque et éolienne qui s'affirment de plus en plus sur le marché pour constituer des filières viables à considérer. Les coûts encore élevés de la filière CSP (solaire thermique) induisant une croissance très lente du développement de ce marché à travers le monde; le parachèvement d'une réglementation nationale cohérente et attractive en direction des investisseurs.

La révision de ce programme porte ainsi, sur le développement du photovoltaïque et de l'éolien à grande échelle, sur l'introduction des filières de la biomasse (valorisation des déchets), de la cogénération et de la géothermie, et également sur le report, à 2021, du développement de la solaire thermodynamique thermique (CSP).

La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour les besoins du marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, dont plus de 4500 MW seront réalisés d'ici 2020 [15].

La répartition de ce programme par filière technologique, se présente comme suit :

- Solaire Photovoltaïque : 13 575 MW
- Eolien : 5010 MW
- Solaire thermique : 2000 MW
- Biomasse : 1000 MW
- Cogénération : 400 MW
- Géothermie : 15 MW

La réalisation du programme permettra d'atteindre à l'horizon 2030 une part de renouvelables de près de 27% dans le bilan national de production d'électricité.

Le volume de gaz naturel épargné par les 22 000 MW en renouvelables, atteindra environ 300 milliards de m³, soit un volume équivalant à 8 fois la consommation nationale de l'année 2014. Conformément à la réglementation en vigueur, la réalisation du programme est ouverte aux investisseurs du secteur public et privé nationaux et étrangers.

La mise en œuvre de ce programme bénéficie de l'apport substantiel et multiforme de l'Etat qui intervient notamment à travers le Fonds National des Energies Renouvelables et Cogénération (FNERC), alimenté par un prélèvement de 1% de la redevance pétrolière.

Un mécanisme d'encouragement basé sur les tarifs d'achat garantis est mis en place par la réglementation. Ainsi, le producteur d'énergie renouvelable bénéficie de tarifs d'achat qui sont garantis pour une durée de 20 ans pour les installations en Photovoltaïque et en éolien.

Les filières ne bénéficiant pas des tarifs d'achat garantis seront financées par le FNERC à hauteur de 50% à 90% du cout d'investissement selon la technologie et la filière retenues.

Les retombées de ce programme seront très significatives en termes de création d'emplois, d'industrialisation, de développement technologique et d'acquisition de savoir-faire, contribuant ainsi à la croissance et à la modernisation économique du pays ainsi qu'à la préservation de l'environnement [16].

9 Conclusion

Dans ce chapitre, une présentation des situations énergétiques mondiale puis Algérienne est présentée. Les prévisions montrent la nécessité de multiplier les recherches en vue de l'utilisation des énergies renouvelables. Il apparait clairement que le recours de plus en plus prononcé aux ressources énergétiques renouvelables, et plus particulièrement de l'énergie solaire. L'internonce du jour et de la nuit défavorise l'énergie solaire qui ne délivré pas en puissance constante, ce qui nécessite une hybridation de système avec un générateur Diesel que nous allons présenter dans le chapitre suivant. Cette association semble être une solution très rationnelle pour répondre aux besoins énergétiques de l'humanité.

Chapitre II

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

1 Introduction

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des coûts du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgente la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie. Un fait qui interpelle plus fort que jamais le développement des énergies renouvelables.

Il existe différentes sources d'énergie renouvelables ; elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire [17].

Les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec les ressources. Pour les régions isolées, la solution à retenir est certainement le couplage entre plusieurs sources, par exemple des éoliennes, des panneaux photovoltaïque et des générateurs diesel.

Le système de génération hybride, peut être combiné à différents types d'énergies renouvelables associées avec des unités disponibles de stockage pour assurer la continuité de la fourniture électrique à l'utilisateur [18].

2 Définition des systèmes hybrides

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 d'énergie hybride (SEH) est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergies : une ou plusieurs sources de production d'énergie classique (groupe diesel en général) et au moins une source de production d'énergies renouvelables. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante ; leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [19].

3 Présentation d'un système systèmes hybrides PV/ Groupe électrogène

3.1 Définition

D'un point de vue général, un système hybride de production d'énergie est celui qui combine plusieurs sources disponibles et mobilisables. En particulier, les applications hybrides à base de solaire combinent le solaire avec une ou plusieurs autres sources. Le plus important étant de satisfaire la demande en énergie, les systèmes hybrides doivent prendre en compte les options suivantes :

- Utilisation d'une ou de plusieurs sources d'énergies renouvelables ;
- Option avec ou sans stockage d'énergie ;
- Option avec ou sans groupe(s) électrogène(s) ;
- Option connectée à un réseau de distribution électrique ou isolée.

Le choix de plusieurs sources d'énergies renouvelables pour constituer un système hybride est conditionné par leurs disponibilités sur le site d'implantation du système. En plus, il doit exister une complémentarité entre les différentes sources. Par exemple, le solaire peut être combiné avec un groupe électrogène

3.2 Intérêt des systèmes hybrides

De nos jours, les groupes électrogènes ne sont plus une meilleure solution, à cause de leurs coûts d'exploitation élevés, de leur maintenance complexe et de la nécessité de transporter et de stocker le carburant. D'une part, la préoccupation grandissante concernant les problèmes environnementaux, d'autre part les progrès en matière de développement de technologies propres contribuent à faire des énergies renouvelables des solutions efficaces en matière de développement durable et de préservation de l'environnement. Les systèmes hybrides présentent les qualités de la fiabilité, flexibilité, économique.

Dans les systèmes hybrides PV/GE, le groupe électrogène permet de réduire la taille du champ photovoltaïque, pendant que le système PV permet de réduire le temps de fonctionnement du groupe, sa consommation en gasoil, les coûts d'exploitation et de maintenance. On peut donc situer l'intérêt des systèmes hybrides à ces niveaux, à savoir :

- diminuer le temps de fonctionnement des groupes électrogènes ;
- diminuer la consommation en gasoil.

Dans les systèmes simples, le groupe électrogène tourne en continu, pour couvrir la différence entre l'énergie demandée et celle produite par le PV ; alors le groupe électrogène fonctionne

souvent sous faible charge ou dans de mauvaises conditions. Dû au faible rendement du groupe pour les faibles charges, l'économie en consommation de gasoil est limitée pour ces systèmes.

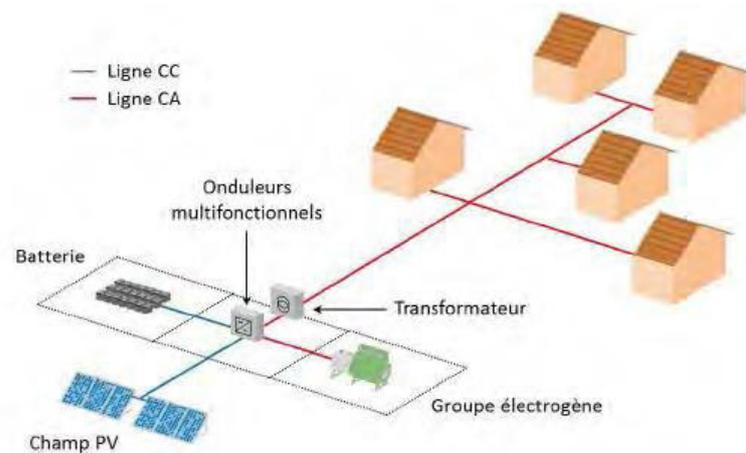


Figure 1 Système d'énergie hybride photovoltaïque-groupe électrogène.

4 Classification des systèmes hybrides

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite du chapitre, seront présentées les classifications les plus répandues.

4.1 Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve le *système hybride travaillant en parallèle avec le réseau électrique* dit aussi connecté au réseau. Ce système contribue 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, le cas d'un refuge de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière..... etc [20], [21], [22], [23].

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 complète, une centrale 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 la période d'absence d'une ressource primaire convertie en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent

être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoir à hydrogène, des volants d'inertie, etc.

La dernière classification possible est celle relative au type de la source d'énergie renouvelable utilisée, la structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur hydraulique (une centrale hydroélectrique, l'utilisation des vagues ou bien une combinaison de ces deux sources). Un critère important pour la sélection de la source utilise le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit de l'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. [21], [24], [25].

Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la figure (II.2) :

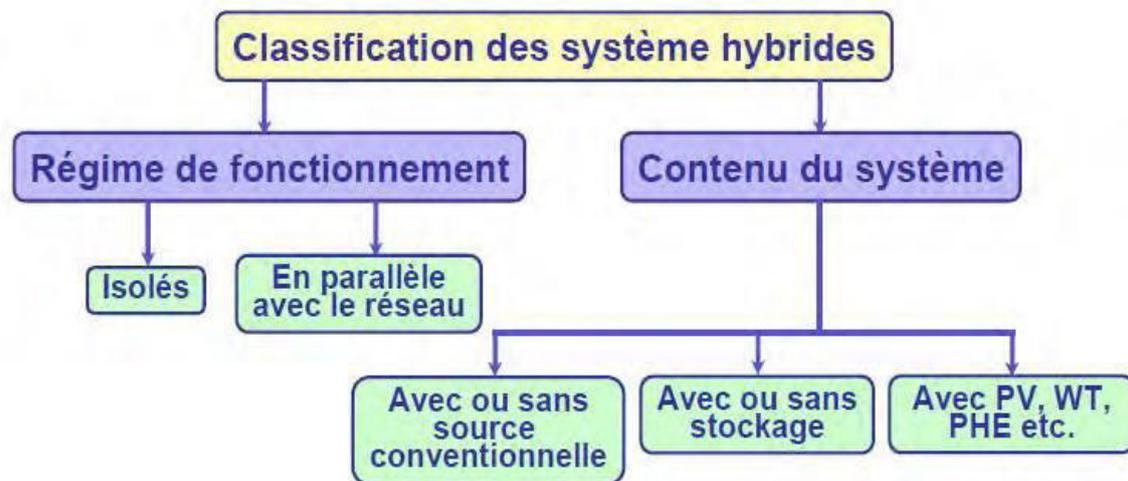


Figure 2 Classification des systèmes [26].

5 Les différentes configurations des systèmes photovoltaïques hybrides

Le champ photovoltaïque génère du courant continu, mais la consommation domestique exige le plus souvent du courant alternatif, c'est pourquoi il est souvent nécessaire d'adjoindre au système un onduleur. De cette façon, le générateur photovoltaïque travaille en parallèle ou en alternance avec le générateur diesel. On distingue les configurations suivantes:

- Système hybride PV - Diesel série.
- Système hybride PV – Diesel commuté.
- Système hybride PV – Diesel parallèle.

Nous présenterons ci-après, les avantages et les inconvénients de chaque configuration [27]

5.1 Configuration série

Dans cette configuration, l'énergie produite par le générateur diesel est d'abord redressée et puis convertie de nouveau en alternatif pour être fournie à la charge, ce qui implique des pertes de conversion significatives. Lorsque l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'énergie stockée sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge, le diesel est débrayé. La puissance en courant continu fournie par le champ et la batterie est convertie en courant alternatif par un onduleur. De plus, il faut noter que dans la plupart des systèmes de ce type, le rendement du système est diminué à cause du transit d'une grande partie de l'énergie par la batterie, augmentant ainsi le nombre des cycles charge – décharge (Figure II.3).

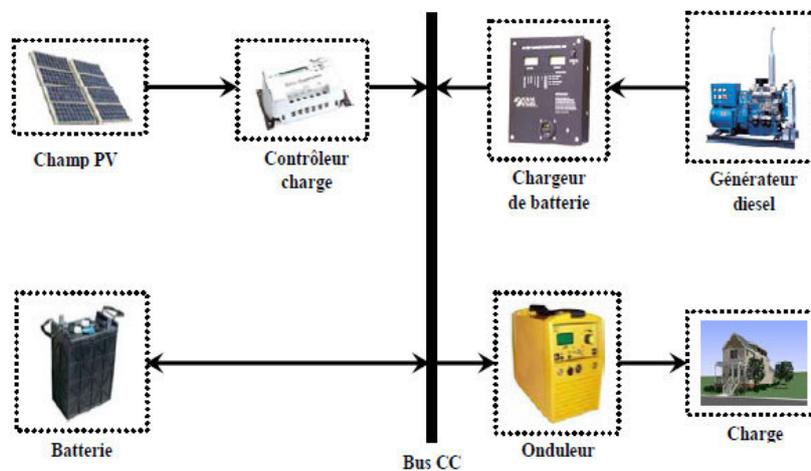


Figure 3 système hybride PV-Diesel série.

Le régime de fonctionnement du générateur dépend d'une part de la demande d'énergie et d'autre part, de l'état de charge de la batterie et de la production du champ PV. La batterie se charge quand de l'énergie est produite en excès par le champ. Au contraire, quand l'énergie produite n'est pas suffisante, alors la batterie se décharge. Le contrôleur solaire prévient la surcharge de la batterie et sa décharge trop profonde. On peut également faire appel à un convertisseur CC/CC (MPPT) qui permettra au champ PV de faire fonctionner le champ à son point maximum de puissance. Le système hybride peut travailler de manière automatique si on ajoute un système de mise en marche et arrêt du générateur diesel.

➤ Les avantages

- La puissance du GE peut être optimale lorsqu'il approvisionne la charge et qu'en plus il charge la batterie jusqu'à un niveau de charge de la batterie de 70 - 80 %.
- Le système électrique est simplifié à cause de l'absence de changement de la source d'électricité en courant alternatif.

- La mise en marche du générateur diesel ne provoque pas d'interruption de l'alimentation de la charge.

- Grâce à l'onduleur, on peut obtenir différentes formes du courant selon les besoins (sinusoïdal, carré,...).

➤ **Les inconvénients**

- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel, c'est pourquoi il doit être dimensionné pour satisfaire la puissance de pointe de la charge.

- La durée de vie de la batterie est diminuée à cause de l'augmentation du nombre des cycles charge - décharge.

- Le rendement total du système est faible à cause des pertes de conversion dues au fait que le générateur diesel ne peut pas fournir son énergie directement à la charge.

- La détérioration de l'onduleur provoque l'arrêt complet de l'alimentation.

5.2 Configuration commutée

Cette configuration est très fréquemment utilisée malgré ses limitations opérationnelles. La charge peut être alimentée soit par le générateur diesel, soit par l'onduleur alimenté par le photovoltaïque ou la batterie mais le fonctionnement en parallèle n'est pas encore possible. La batterie peut être chargée de nouveau par le champ PV et le diesel. L'avantage principal de cette configuration par rapport à la configuration série consiste dans l'élimination de la conversion de l'énergie fournie par le générateur d'où l'élimination des pertes supplémentaires de conversion.

En principe, la puissance produite par le générateur est supérieure à la demande de la charge et l'excès est utilisé pour la charge de la batterie. Comme dans le cas précédent, le diesel est arrêté, lorsque la demande est faible et peut être satisfaite par le champ photovoltaïque et la batterie. La complexité du système implique l'utilisation d'un contrôle automatique à la place de la commande manuelle (Figure 4).

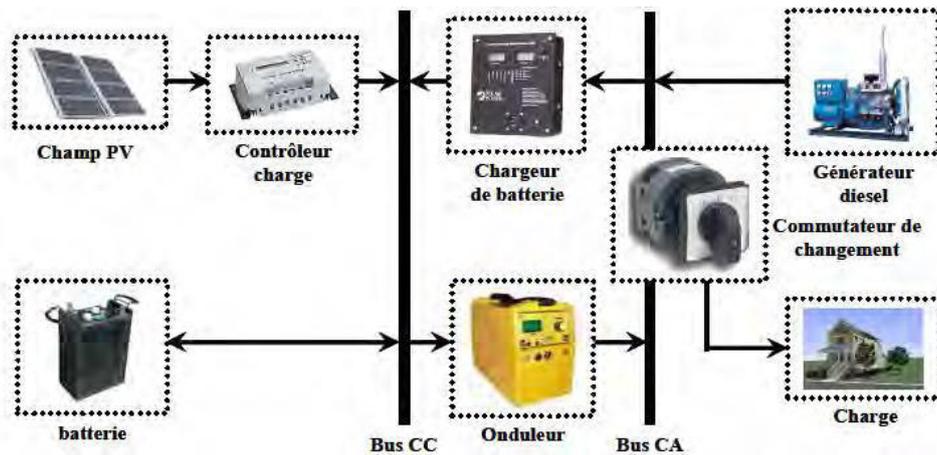


Figure 4 Système hybride PV-Diesel commuté.

➤ **Les avantages**

- Différentes formes du courant sont possibles, selon les besoins (sinusoïdal, signal carré).
- Le générateur peut fournir l'énergie produite directement à la charge, ce qui augmente le rendement du système et diminue la consommation de carburant.

➤ **Les inconvénients**

- Il y a une coupure instantanée, lors de la commutation des sources alternatives.
- Le générateur et l'onduleur sont dimensionnés pour la puissance pointe de la charge, ce qui réduit leurs rendements en fonctionnement à faible charge.

5.3 Configuration parallèle

Dans la configuration parallèle, toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demande mais également suppléer les pointes en combinant les sources.

L'onduleur bidirectionnel peut fonctionner, soit comme un redresseur lorsqu'il y a un excès d'énergie produite par le diesel pour charger la batterie, soit comme un onduleur, pour transférer l'énergie fournie par le champ photovoltaïque ou par la batterie vers la charge. Grâce à l'onduleur bidirectionnel, le système parallèle peut alimenter une charge supérieure à la puissance nominale du générateur (Figure II.5).

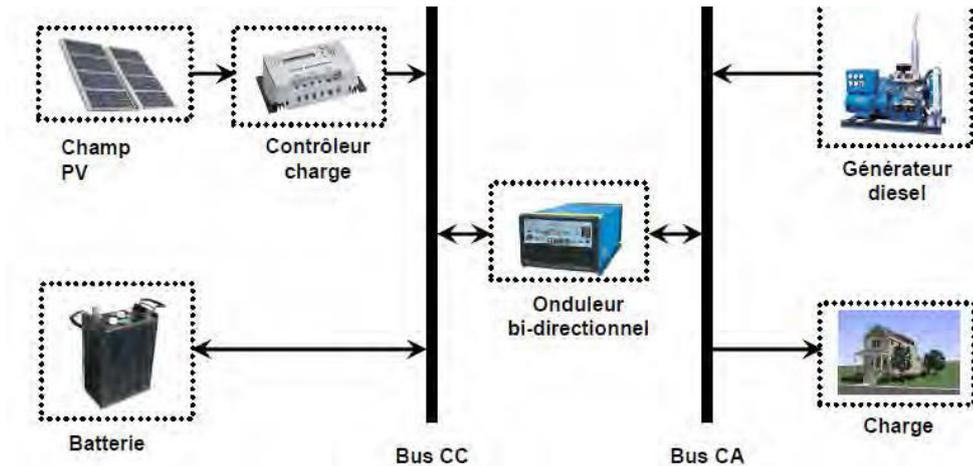


Figure 5 Système hybride PV-Diesel parallèle.

Ce système possède deux améliorations par rapport aux configurations série et commutée. L'association du générateur diesel et de l'onduleur permet l'alimentation d'une charge supérieure à la charge alimentée par chaque élément seul. En principe, la capacité du système est deux fois plus grande dans cette configuration. La possibilité de synchroniser l'onduleur avec le générateur diesel permet une meilleure flexibilité du système et de plus, la puissance nominale du générateur diesel peut être diminuée, ce qui augmente la partie de l'énergie directement utilisée d'où on obtient une augmentation du rendement du système.

En utilisant un seul convertisseur comme onduleur et redresseur, on diminue le nombre des éléments dans le système. De plus, les coûts du câblage et l'installation du système peuvent être diminués par l'intégration de toutes les composantes dans une seule unité, ce qui est avantageux, mais peut empêcher l'augmentation de la taille du système par l'ajout de nouveaux composants si la demande en électricité augmente.

➤ **Les avantages**

- L'alimentation de la charge peut être faite d'une manière optimale.
- Le rendement du générateur diesel peut être augmenté.
- Le besoin d'une maintenance du diesel est réduit.
- Les puissances nominales des différents éléments peuvent être diminuées par rapport aux puissances nominales dans les autres configurations, en alimentant toujours la même charge.

➤ **Les inconvénients**

- Le contrôle automatique est indispensable pour le fonctionnement du système.

- L'onduleur doit fournir un courant sinusoïdal pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.

- Le fonctionnement du système n'est pas évident pour une personne non formé.

Dans ce papier, nous avons choisi d'étudier un système hybride photovoltaïque fonctionnant selon la configuration série et nous étudierons les différents flux d'énergie qui prennent place au sein de ce système.

6 Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïques-diesel

6.1 Généralité sur les systèmes photovoltaïques

6.1.1 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire qui fait partie des énergies renouvelables. La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée ou alimenter un réseau de distribution.



Figure 6 1-Cellule PV 2- Panneau PV 3-Champ PV.

6.1.2 Effet photovoltaïque

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photovoltaïque. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein à découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules appelées les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation (II.1) [5].

$$E_{ph} = \frac{h.c}{\lambda_0} \quad (II.1)$$

Où

E_{ph} : Énergie du photon (en joule)

λ_0 : la longueur d'onde (m)

h : la constante de Planck $6.626 \cdot 10^{-34}$ J/s j .s

C : la vitesse de la lumière. $6 \cdot 10^8$ m/s

6.1.3 Générateur photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est comparable à une diode photo-sensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi conducteurs. La cellule photovoltaïque assure la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi conducteur figure(II.7). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [28]. Les cellules les plus répandues actuellement sont à base de silicium .Le rendement des modules en fonction des différentes technologies fait apparaître des écarts importants :

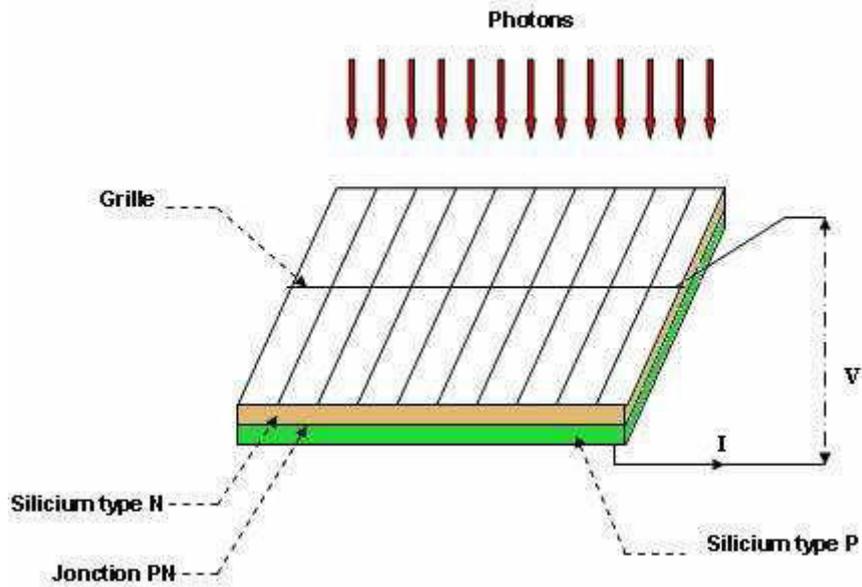


Figure 7 Schéma descriptif d'une cellule photovoltaïque.

6.1.4 Les technologies des cellules photovoltaïques

Il existe un grand nombre de technologie mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement. Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : Le silicium mono ou poly-cristallin et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

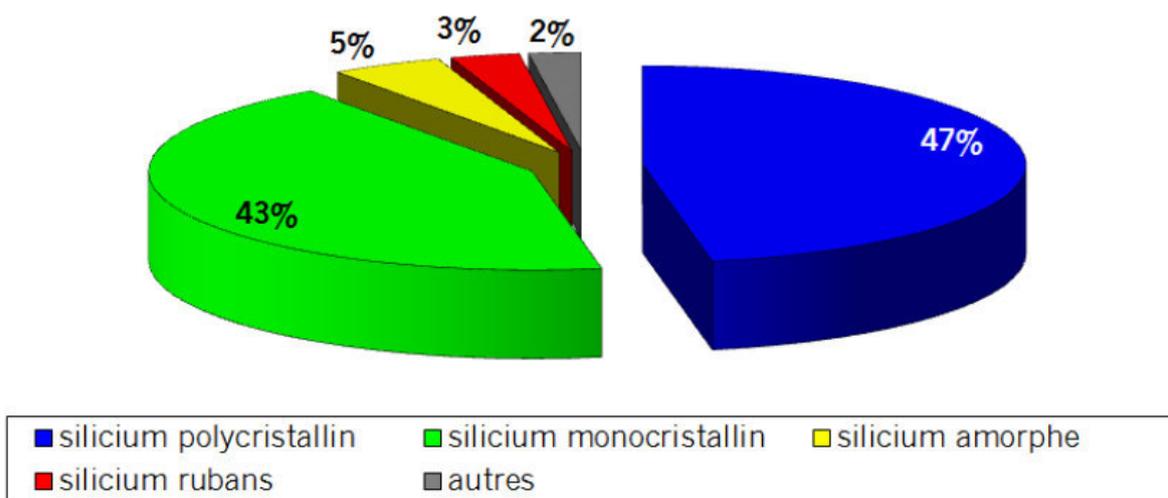


Figure 8 Les ratios d'utilisations des technologies des cellules photovoltaïque.

6.1.4.1 La Silicium cristallin

Le silicium cristallin est de loin le matériau le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque.

On en dénombre 3 types différents [29], [30], [31].

- **Le silicium monocristallin :** est un matériau de très haute pureté. Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, permet la fabrication de cellules conventionnelles à haut rendement mais il est très coûteux.
- **Silicium polycristallin :** est fabriqué principalement à partir de source de matériau moins raffinées. C'est le matériau qui conduit au coût le plus faible au watt crête.
- **Le silicium en ruban :** cette solution séduisante consiste à produire directement des plaques minces ($<200\mu\text{m}$) de silicium multicristallin. Cependant cette technique n'a pas réussi à s'imposer, en raison notamment de la moins bonne qualité du silicium obtenu et des vitesses de tirage trop faible. Cependant les meilleures cellules produites présentent des rendements de conversion moyens d'environ 14%.

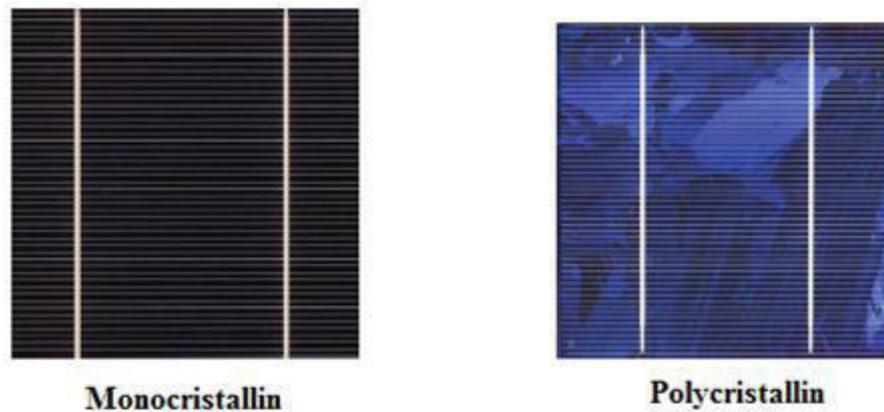


Figure 9 Cellules monocristalline et poly-cristalline.

6.1.4.2 Silicium amorphe

Une autre forme de silicium est également utilisée pour la fabrication de cellule photovoltaïque : Le silicium amorphe.

L'avantage du silicium amorphe est qu'il est déposé à basse température ce qui permet l'utilisation de substrats bas coût (verre). De plus grâce à sa pseudo-largeur de bande interdite de 1.7eV, et une absorption très importante, quelques microns suffisent [31]. Avec des jonctions multiples, on peut atteindre des rendements de 12% à 13% au laboratoire [32], [33], [34], [35].



Figure 10 Module en silicium amorphe.

6.1.4.3 Les couches minces (Composites (CIS, CGIS et CdTe))

D'autres matériaux sont également utilisés : le tellure de cadmium (CdTe), le séléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies basées sur des films minces sont encore très coûteuses mais elles laissent espérer des rendements et une durée de vie au moins équivalents au silicium [31].

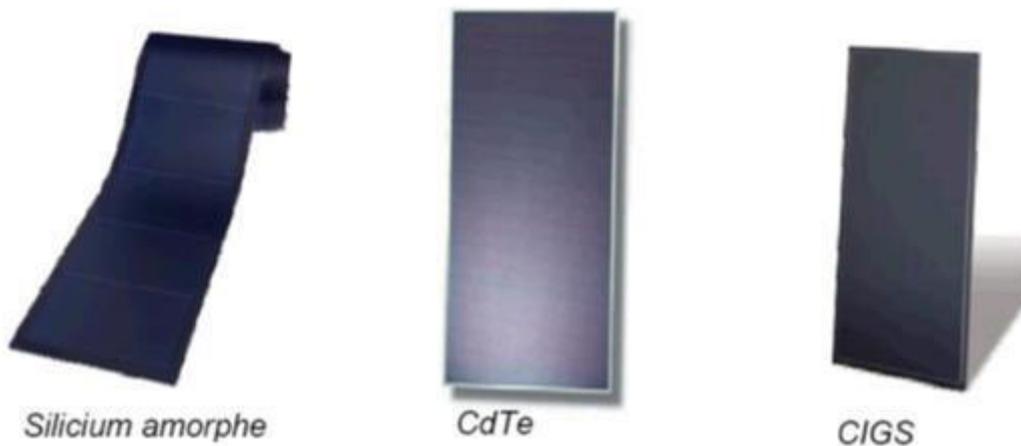


Figure 11 Modules PV en couche mince.

6.1.4.4 Cellules organiques

Les cellules solaires à base de matériaux organiques ou de polymère sont caractérisées par leur faible coût, matière illimitée, facilité de mise en œuvre, dispositifs souples. Il existe aujourd'hui des cellules photovoltaïques organiques dont le rendement de conversion dépasse la barre des 10% [31].

Type de cellule	Rendement des cellules			Domaines d'application
	Théorique	En laboratoire	Disponibles	
<i>silicium monocristallin</i>	27,0%	24,7%	14,0 -16,0%	Modules de grandes dimensions, appareils de faibles puissances, espace
<i>silicium polycristallin</i>	27,0%	19,8%	12,0-14,0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles
<i>Silicium amorphe</i>	25,0%	13,0%	6,0-8,0%	Appareils de faible puissance production d'énergie embarquée. Modules de grandes dimensions
<i>Arséniure de Galium GaAs</i>	29,0%	27,5%	18,0-20,0 %	Systèmes de concentrateur, espace
<i>Cuivre-Indium Gallium-Sélénium CIGS</i>	27,5%	18,2%	10,0-12,0%	Appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions
<i>Tellure de Cadmium CdTe</i>	28,5%	16,0%	8,0%	Modules de grandes dimensions
<i>silicium en ruban</i>	27,0%	27,0%	9,0-11,0%	Module non spécifique

Tableau 1 Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques [36]

6.1.5 Caractéristiques des cellules photovoltaïques

La caractéristique courant-tension $I(V)$ simulée d'un module PV est représenté dans la figure (II.12). La caractéristique est obtenue à un niveau constant de l'éclairement énergétique et par le maintien d'une température constante des cellules.

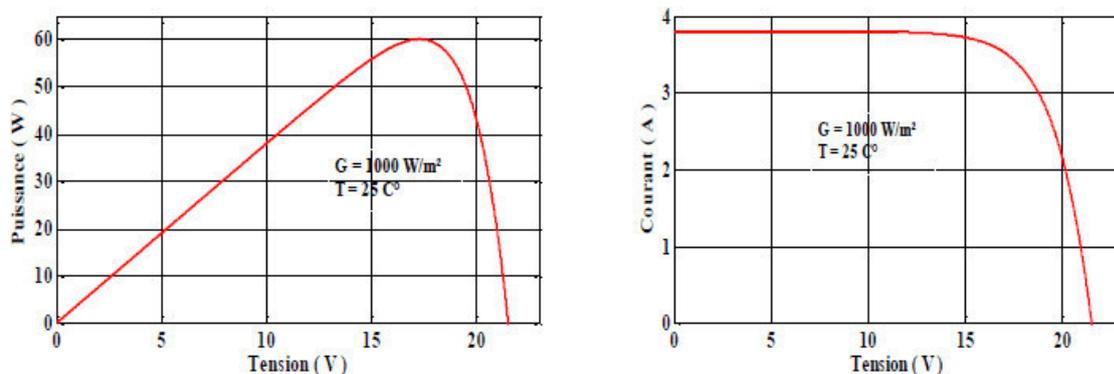


Figure 12 Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'un module solaire.

Les deux points les plus importants sur cette caractéristique sont le courant de court-circuit (I_{sc}) et la tension du circuit ouvert (V_{oc}). Le courant de court-circuit (I_{sc}) est le courant maximal produit lorsque la cellule est court-circuitée et la tension à ces bornes est zéro, correspondant à une charge nulle. La tension en circuit ouvert (V_{oc}) est la tension aux bornes de la cellule dans des conditions de circuit ouvert, quand le courant est nul, ce qui correspond à une résistance proche de l'infini aux bornes de la cellule.

La figure (II.12) représente les caractéristiques puissance-tension $P(V)$ et courant-tension $I(V)$ simulées des modules photovoltaïques. Afin d'extraire le maximum d'efficacité d'une cellule solaire, il est nécessaire de faire fonctionner la cellule à l'endroit où la cellule permet une puissance maximale. Cette méthode d'exploitation est connue par le point de puissance maximale (MPP).

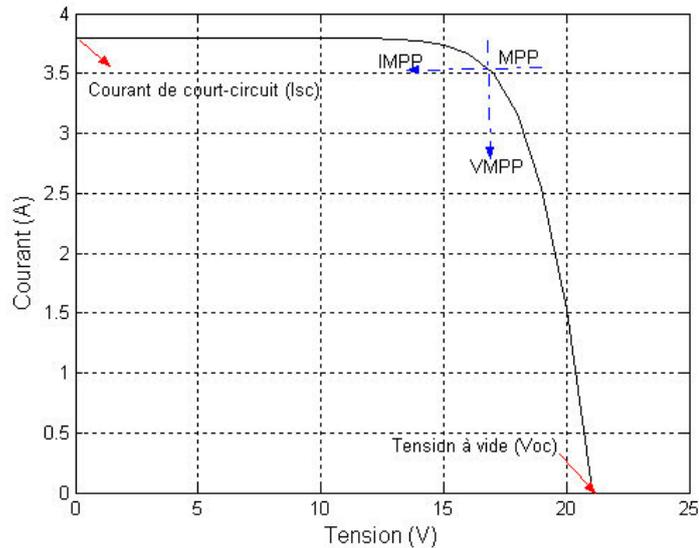


Figure 13 Caractéristiques I-V d'un panneau PV.

6.1.6 Les équipements d'un système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué des éléments suivants:

- générateur PV
- Régulateur (Contrôleur)
- Stockage d'énergie (Batteries)
- Convertisseur (onduleur)
- La charge

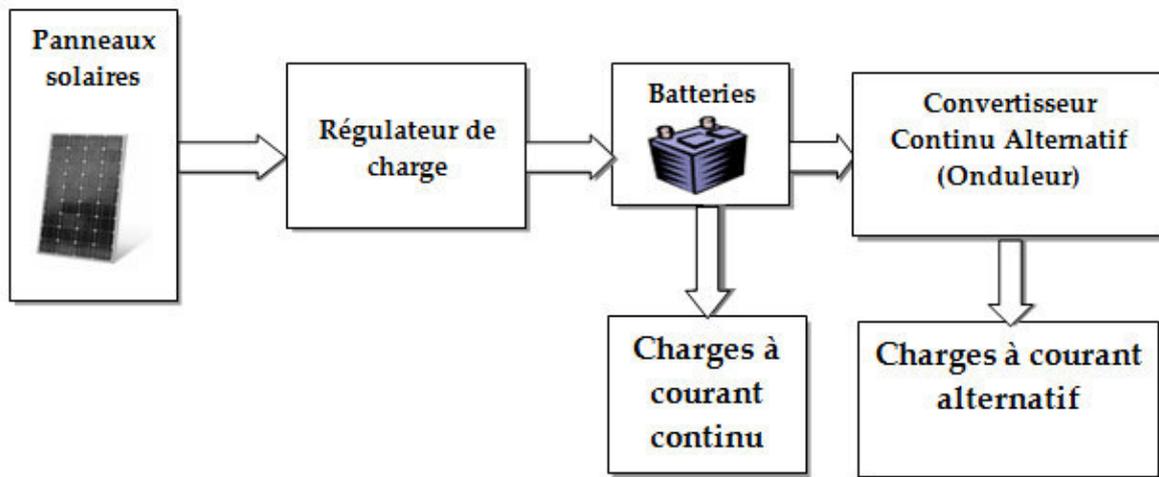


Figure 14 Schéma d'un système photovoltaïque.

- **Panneaux solaire** : est un dispositif technologique énergétique solaire à base de capteurs solaires à base de capteurs solaires thermiques, ou photovoltaïques, destiné à convertir le rayonnement solaire en énergie thermique ou électrique.
- **Régulateur** : La régulateur de charge sert à réguler le niveau d'énergie emmagasinée par les batteries afin d'éviter les surcharges, et aussi les décharges profondes.
- **Batterie de stockage** : Bien que le développement scientifique se poursuive, le stockage de l'énergie électrique est toujours un défi. L'utilisation d'une batterie est très importante dans tous les systèmes hybrides. Le système de batterie permet de résoudre l'inconvénient majeur des énergies renouvelables celle de non continuité de production de l'énergie dans des situations spécifiées, les batteries construit par l'acide et du plomb compromet l'efficacité à être chargé et déchargé pour une longue période ce qui les rend idéales à l'application avec des systèmes des énergies renouvelables. Actuellement, les batteries plomb-acide ont une efficacité aller-retour d'environ 75% et une espérance de vie de 20 ans [37].
- **Convertisseur** : Leur utilité sert à charger les batteries de stockages et faire la conversion électrique par la transformation de CC au CA et inversement, dans la structure des SH on trouve trois types de convertisseurs les redresseurs, les hacheurs et les onduleurs. Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA, ce sont des appareils relativement simples, pas chers et a bon rendement.

Les onduleurs sont des convertisseurs CC/CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. L'onduleur non autonome

exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer le fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur ; Ceux-ci sont les plus flexibles, mais aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

Les hacheurs sont des convertisseurs qui permettent de réaliser la conversion CC /CC pour adapter la tension entre deux sources [38].

➤ **La charge :**

Les charges électriques rendent utile une puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et les charges inductives. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau, etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont de charges résistive et inductive. Ils sont les principaux consommateurs de puissance réactive.

Les charges à courant continu (CC) peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendantes changements dans le fonctionnement du système [39].

6.2 Généralité sur les générateurs diesel

6.2.1 Définition des générateurs diesel

Les générateurs diesel dites aussi groupes électrogènes figurent parmi les différents moyens de production d'électricité. Le fonctionnement d'un groupe électrogène se base sur le principe suivant lequel l'énergie mécanique est produite par un moteur diesel (moteur thermique) qui entraîne un alternateur produisant de l'électricité.

Le générateur diesel est destiné pour plusieurs applications :

- Production d'énergie électrique de secours.
- Production d'énergie électrique de pointe.
- Production d'énergie électrique.

6.2.2 Les différents composants d'un générateur diesel

Un générateur diesel est généralement constitué des composants suivants :

1. **Un moteur diesel** : est un moteur thermique à combustion interne, conçu généralement par 4 ou 6 cylindres. Le moteur génère une vitesse de rotation qui sera transmise à l'alternateur.
2. **Arbre du moteur** : est dit aussi l'arbre primaire

- 3. Régulateur de vitesse** : est un système qui permet de régler la vitesse de rotation de l'arbre.
- 4. Un embrayage** : est un moyen d'accouplement entre le moteur diesel et la machine synchrone.
- 5. Une machine synchrone** : est une machine qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

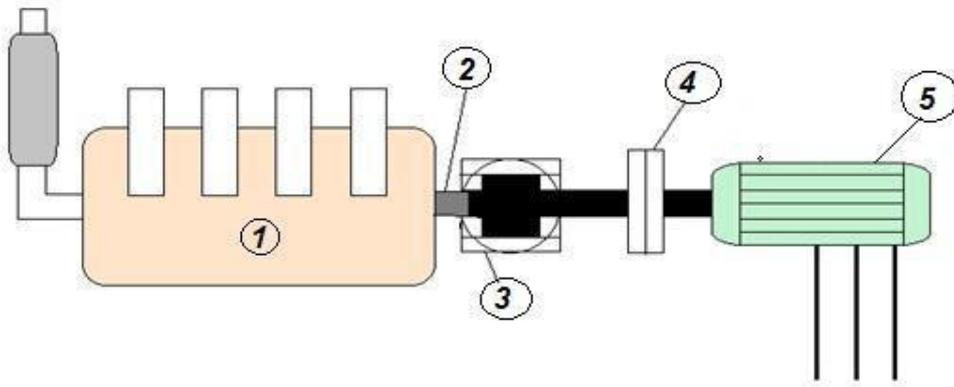


Figure 15 Les éléments constitutifs d'un générateur diesel [40].

6.2.3 Le principe de fonctionnement

Le principe d'un générateur diesel est simple, il se base sur la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Suite à la combustion du carburant (le diesel) dans le moteur, un couple mécanique sera fournie à l'arbre du moteur, cette énergie met l'arbre en rotation, cette vitesse sera contrôlé et régler avec un régulateur de vitesse composé d'un actionneur et une commande de réglage (PI-PID...). Après le réglage de la vitesse l'énergie mécanique sera couplée à l'arbre de la machine synchrone avec un embrayage, la machine synchrone transforme le couple mécanique reçu par l'arbre en une énergie électrique composée de trois phases de courant.

7 Architecture d'un système d'énergie hybride

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesels et d'au moins une source d'énergie renouvelable, un SEH peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des charges et une option de gestion des charges ou un système de supervision [41]. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. Celles-ci sont résumées sur la figure (II.16) ci-dessous. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques

contiennent deux bus : un bus à CC pour les batteries, les sources et les charges à CC et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution. Les sources d'énergies renouvelables peuvent être connectées au bus à CA ou à CC en fonction de la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. A part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charges différées, charge optionnelle, charges de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie. Ainsi, dans un SEH avec les batteries de stockage et charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelables et des diesels), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite, il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : charge et source [41].

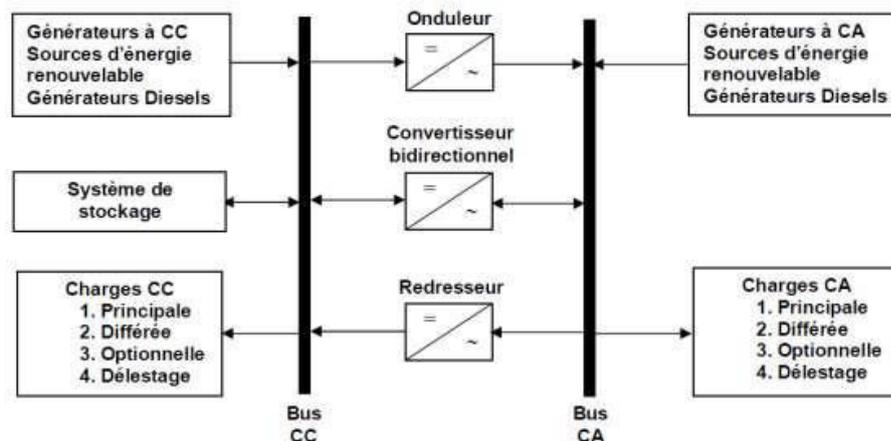


Figure 16 Architecture des SEH.

7.1 Architecture à bus à CC

Dans le système hybride présenté par la figure (II.18), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Les sources d'énergie CA (générateurs diesels, éoliennes), leurs puissances fournies sont converties en CC. La charge principale à CA est alimentée via un convertisseur CC/CA à partir du bus CC, qui doit suivre la consigne fixée par l'amplitude et la fréquence. Les batteries et le convertisseur CC/CA seront dimensionnés pour alimenter les pics de charge, tandis que les générateurs diesels sont dimensionnés pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps [42], [43].

Les avantages et inconvénients de cette configuration :

➤ **Les avantages**

- La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- Le générateur diesel peut être optimisé de telle manière qu'il fonctionne à sa puissance nominale pendant le processus de chargement de batteries.

➤ **Les inconvénients**

- Le rendement de cette architecture est faible dû à certaines pertes d'énergie 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.

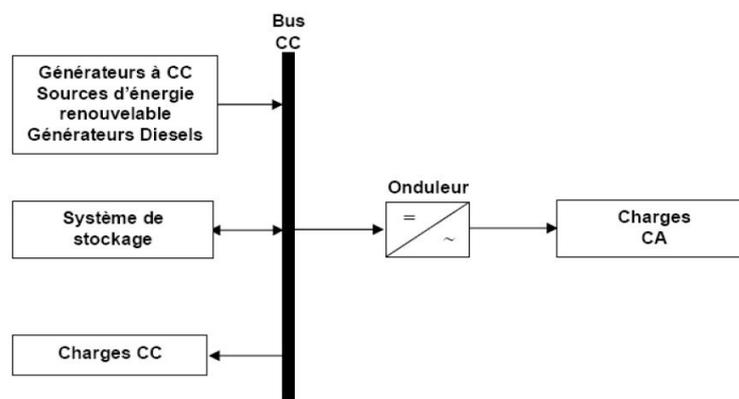


Figure 17 Architecture a bus a CC[42].

7.2 Architecture à bus à CA

Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté CA permet désormais de réaliser des systèmes flexibles constitués de composants modulaires. En fonction de l'application et des sources d'énergie disponibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelables que conventionnelles. Le système peut en outre être élargir en toute simplicité par ajout de composants ou de générateurs électriques pour répondre à des besoins en énergie croissants. Tous les sources de production sont reliées à bus CA via un convertisseur sauf le générateur diesel qui peut fixer la fréquence de bus [42]. Celles-ci sont montrées dans la figure(II.19).

Les avantages et inconvénients de cette configuration :

➤ **Les avantages**

- Un découplage de différentes sources de production ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres
- le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence de bus CA.

- Appareillage de connexion bon marché et disponible facilement.
- Les circuits triphasés produisent un champ magnétique rotatif permettant des moteurs compacts et efficaces.
- Capacité d'augmenter et de réduire la tension à l'aide d'un simple dispositif passif (transformateur).
- La fréquence peut être utilisée comme moyen de contrôle (dérive de fréquence).
- **Les inconvénients**
- le rendement de cette configuration est faible dû à certaines pertes d'énergie à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- la connexion de toutes les sources sur un bus CA complique le système de commande.

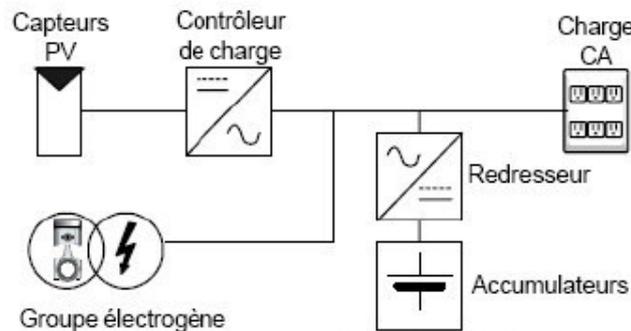


Figure 18 Architecture à bus à CA

7.3 Architecture mixte à bus à CC/CA

La configuration à deux bus à CC et à CA, est présentée dans la figure (II.20). Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration à bus à CC. Dans cette architecture, les sources d'énergies renouvelables 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 générateur diesel et de l'onduleur. Les générateurs diesels et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie. Les convertisseurs situés entre les deux bus (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 [43].

Les avantages et inconvénients de cette configuration :

- **Les avantages**

- Se récapitulent au fonctionnement autonome ou parallèle du GD et l'onduleur, quand la demande de charge augmente l'un ou l'autre peut générer l'énergie nécessaire. Ainsi que les sources renouvelables et diesels 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.

➤ Les inconvénients

- La seule difficulté liée à cette configuration sa réalisation s'avère peu compliquée à cause du fonctionnement parallèle, qui demande que l'onduleur doive être capable d'évoluer en état autonome et non autonome en synchronisant la tension de sortie à la tension du générateur diesel.

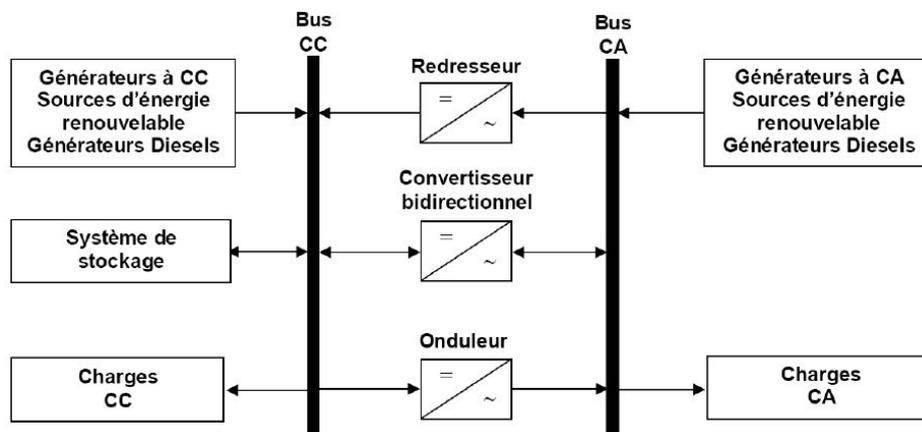


Figure 19 Architecture mixte a bus CC/CA[43].

8 Coûts intervenant dans l'hybridation des systèmes

On peut distinguer deux types de coût qui interviennent dans l'hybridation d'une centrale :

- Le coût d'investissement
- Le coût de fonctionnement.

8.1 Coût d'investissement

Les coûts d'investissement interviennent au début de la phase de réalisation du projet et comprennent tous les coûts qui sont liés à l'achat des composants nécessaires, au transport, à l'installation et à la mise en service du système. Les coûts d'investissement dépendent de :

- Dimensionnement et du nombre de composants du système

- Type et de la qualité des différents composants
- Frais de transport
- Du coût de montage et de réalisation

Le coût annuel d'investissement de chaque composant k du système ($\text{coût}_{a \text{ inv comp } k}$) est donné par :

$$\text{Coût}_{a \text{ inv comp } k} = \text{Coût}_{\text{inv comp } k} \cdot T_{\text{utilisation}}$$

Coût_{a inv comp k} : Coût d'investissement du composant k

T_{utilisation} : durée d'utilisation du système en ans

Le gain annuel induit par la récupération de groupes électrogènes $\text{Coût}_{a \text{ groupe récup}}$ est calculé comme suit :

$$\text{Coût}_{a \text{ groupes}} = \text{Coût}_{\text{récup groupe}} \cdot T_{\text{récup utilisation}}$$

Coût_{récup groupes} : Coût des groupes électrogènes récupérés.

Le coût annuel d'investissement du projet $\text{Coût}_{a \text{ inv projet}}$ se compose de la somme des coûts annuels d'investissement de chaque composant k du système :

$$\text{Coût}_{a, \text{ inv, projet}} = \sum_{k=1}^{n_{\text{comp}}-1} \text{Coût}_{a, \text{ inv, comp } k} - \text{Coût}_{a, \text{ groupe, recup}}$$

Où :

$n_{\text{comp}}-1$: Nombre de composants du système sans compter les groupes diesel.

8.2 Coût de fonctionnement

Les coûts de fonctionnement dans un projet d'hybridation sont beaucoup plus difficiles à déterminer que les coûts d'investissement. Les coûts d'investissement se produisent à la date de paiement de l'investissement donc ils interviennent simultanément à la date de mise en service du système. Ainsi, ils sont parfaitement connus pendant la phase d'étude et de conception du projet. Les coûts de fonctionnement interviendront de façon plus ou moins régulière durant toute la phase d'utilisation à partir de la date de mise en service du système.

Ils contribueront donc aux flux de trésorerie futurs.

Nous distinguons trois types principaux de coûts de fonctionnement :

- Les coûts de remplacement ($\text{Coût}_{\text{rempl comp k}}$).
- Les coûts d'entretien et de maintenance ($\text{Coût}_{\text{a em hyb}}$).
- Les coûts énergétiques.

9 Avantages et enjeux du système hybride

9.1 Avantages

Les principaux avantages apportés par ce projet de système hybrides sont :

- Amélioration de la qualité du service
- Extension de la durée du service aux heures de faible demande
- Réduction de la consommation de carburant
- Diminution de l'utilisation du groupe électrogène (énergie fossile)

9.2 Enjeux

- A l'heure actuelle la technologie hybride PV-diesel appliquée à l'électrification rurale nécessite encore des mécanismes de subvention
- La technologie est significativement plus complexe que les solutions basées sur un groupe électrogène seul

10 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur le système d'énergie hybride (S.E.H) qui combine un système très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes photovoltaïques qui couplé avec une source d'énergie conventionnel, Groupe électrogène.

Nous allons présentés les différents caractéristiques et structures et leurs classements du système hybride photovoltaïque-GE, en ce basant sur les différents définitions des constitutifs de ce système, ainsi que ces avantages et ces inconvénients.

CHAPITRE III

Design et dimensionnement du système PV- diesel

1 Introduction

Notre étude consiste à faire une simulation sous le logiciel Homer d'une installation hybride PV-DISEL pour la production d'énergie électrique afin d'alimenter les besoins de l'aéroport HOWARI BOUMEDEIN situé à Alger Dar-el Beida

Pour cela, nous allons d'abord commencer par la présentation de ce logiciel HOMER, en suite nous passerons à la présentation du site choisi à l'étude, ses coordonnées géographique et l'évolution détaillée des ressources d'origine renouvelable (solaire), après nous passerons à l'estimation des besoins énergétiques de l'aéroport. Cette étape nous permet d'avoir un meilleur dimensionnement des éléments de notre installation.

2 Présentation du logiciel Homer

HOMER (Hybrid Optization Model For Renewable) élaboré par NREL (National Renewable Energy Laboratory) dès 1993 est un logiciel de simulation et d'optimisation des installations simples et hybrides, autonomes ou connectées au réseau, il permet d'analyser les systèmes de production d'électricité d'origine hybrides composé de groupe électrogène, de système de cogénération d'éoliennes, hydrauliques, de système photovoltaïque, des batteries, de pile de combustible, de la biomasse....)

Pour concevoir un système énergétique sous Homer on doit définir tous les éléments de ce dernier dans la bibliothèque du logiciel par la commande Add /Remode. Il faut aussi donner le nombre de chaque composant dans l'installation à simuler. Les caractéristiques d'un composant déjà existant dans la bibliothèque peuvent être modifiées.

3 Fonctionnement de Homer

Homer simule le fonctionnement d'un système en faisant des calculs du bilan d'énergie pour chacune des 8760 heures par an. Pour chaque heure, Homer compare la demande électrique par heure à l'énergie que le système peut fournir à cette heure, et calcule les flux d'énergie en provenance de chaque composant du système.

Homer effectue ces calculs du bilan d'énergie pour chaque configuration du système que nous voulons examiner. Il détermine ensuite si la configuration est faisable. C'est-à-dire, si elle

peut répondre à la demande d'électricité dans les conditions données, et les estimations du cout d'installation et le fonctionnement du système au cours de la durée de vie du projet. Il calculera le cout du système en tenant compte des différents couts tels que le capital, le remplacement, l'exploitation et l'entretien.

Après avoir toutes les configurations possibles, elles seront classés par ordre croissante de la (NPC) valeur Actuel Nette. Pour chacune de ces solutions possibles, Homer fournit tous les paramètres de fonctionnement des composants et de l'ensemble de l'installation

Lorsque les variables de sensibilités sont définis comme entées, Homer répète le processus d'optimisation pour chaque variable de la sensibilité qui sera spécifié.

4 Création du système hybride

D'après la bibliothèque de logiciel Homer, on peut insérer les différents éléments de notre système hybride tel que la charge, les modules photovoltaïques, les générateurs, les batteries et les convertisseurs, le choix des différents composants des systèmes sont représentés dans la figure suivante :

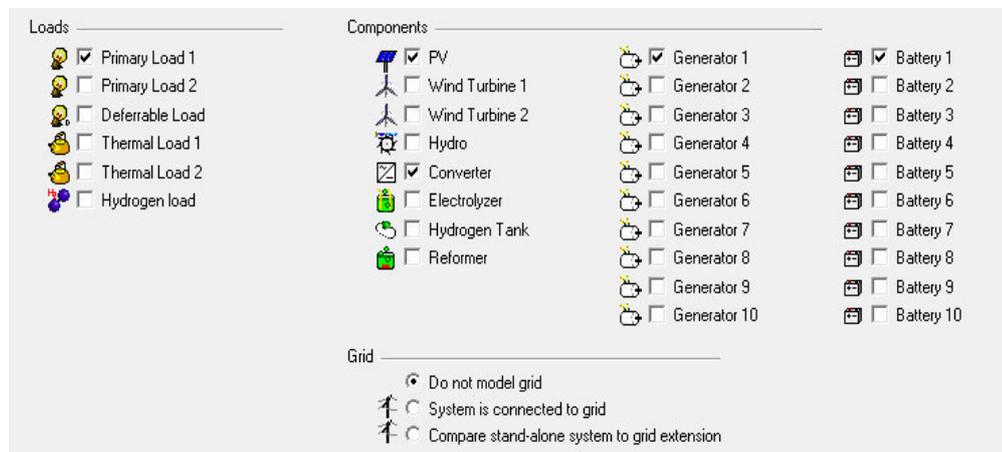


Figure 1 Interface de Homer (Équipement à choisir)

Les éléments citer ci-dessus ont des caractéristiques prédéfini dans la base de données du logiciel et qui peut être modifié, une fois les caractéristiques choisies les propriétés s'affichent automatiquement comme le model de la batterie, la puissance en KW selon le système, le courant (A) et le voltage (V) convertisseur. Il ya aussi des ressources lier avec le site de

l'ONM comme les données du gisement solaire, il suffit de faire rentrer la longitude et la latitude du cite choisis

5 Présentation de l'Aréport Houari Boumediene :

L'aéroport international d'Alger - Houari Boumediene, anciennement aéroport d'Alger-Maison Blanche, communément appelé « Alger - Houari Boumediene », est un aéroport algérien, situé sur la commune de Dar El Beida à 16 km à l'est d'Alger.

Premier aéroport algérien par son importance et le meilleur aéroport d'Afrique en 2015, le classement est déterminé par un vote des voyageurs, et basé sur l'expérience globale dans l'aéroport.

Devant l'augmentation rapide du trafic passager, les travaux d'une troisième aérogare d'une capacité de dix millions de passagers sont entamés en 2015. Le coût de cette extension de l'aéroport est estimé alors à près de 74 milliards de dinars algériens (DA). Dans le projet initial, les responsables annoncent que l'extension occupera une superficie de 20 hectares. Il est également prévu qu'il y aura un parking pour les véhicules d'une capacité de plus de 4 500 places. Sont prévus également trois parkings avions et des voies de circulation sur une superficie de plus de 424 000 m²



Figure 2 Nouvelle aérogare de l'aéroport

6 Caractéristique de la région de Dar El Beida

Le dimensionnement du système hybride PV-Diesel est basé sur les données météorologiques et géographiques effectuées pour le site d'Alger. Pour cette étude, nous nous sommes procurés, auprès de l'ONM, les données météo.

6.1 Données géographiques

L'estimation du potentiel solaire disponible sur un site est sans doute l'étape la plus importante l'orçequ'il s'agit d'envisager l'implantation d'un système exploitant une source d'énergie renouvelable , pour notre cas nous avons choisi la région d'Alger afin d'étudier la possibilité de subvenir au besoins électriques de l'Aréport Houari Boumediène situé sur la commune de Dar El Baida à 16 km à l'est de la wilaya.

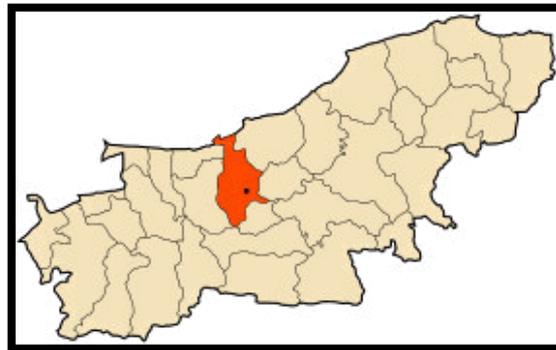


Figure 3 Situation géographique de Dar El-Beida –Alger

Le tableau ci-après (III.1), représente les différentes caractéristiques géographiques de la station de mesure d'Alger.

Latitude	Longitude	Altitude
36.7224 N	3.2264 E	186m

Tableau 1 Caractéristiques géographiques du la station météorologique d'Alger.

7 Données météorologiques

7.1 Variation mensuelle de l'irradiation

Pour l'ensoleillement, nous avons acquis les données mensuelles de la durée d'insolation, Le facteur d'éclairement, prise à partir des données, La durée d'insolation maximal et les données astronomique du lieu.

A l'aide du logiciel HOMER des valeurs du facteur d'éclairement et des caractéristiques du site de mesure (tableau III.1), l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois de l'année et déterminée les résultats sont reportés au tableau (III.2). En figure (III.4)

L'évaluation mensuelle de l'irradiation (en jaune) ainsi que celle du facteur d'éclairement (en rouge) sont représentées.

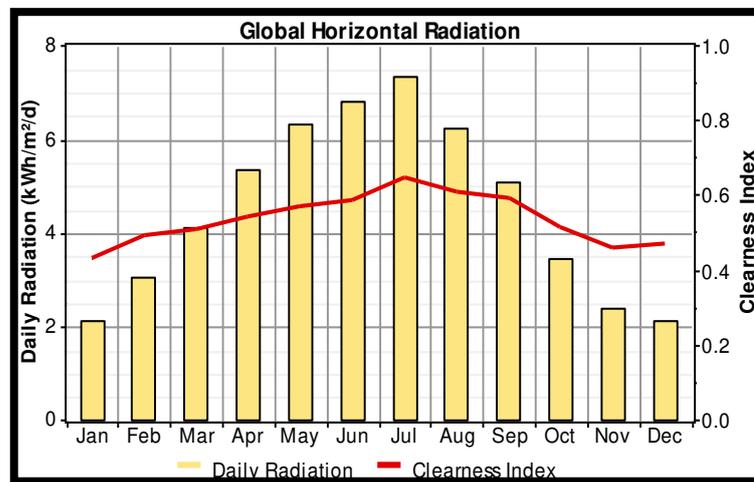


Tableau 2 Evolution de l'ensoleillement mensuelle de la région d'Alger.

Mois	Facteur d'éclairement	Irradiation (KWh/m ² /j)
Janvier	0.432	2.100
Février	0.490	3.040
Mars	0.508	4.100
Avril	0.544	5.370
Mai	0.570	6.320
Juin	0.588	6.800
Juillet	0.648	7.320
Aout	0.605	6.230
Septembre	0.589	5.100
Octobre	0.512	3.450
Novembre	0.460	2.370
Décembre	0.472	2.100

Tableau 3 Données du rayonnement solaire de la région d'Alger

On remarque que l'irradiation solaire moyenne maximale est enregistrée pour le mois de juillet et sont minimale durant le mois de janvier et décembre.

7.2 Données de la température

Pour la température de la région d'Alger, de la même manière, nous nous sommes procurés, auprès de l'ONM à enregistré des températures dans le tableau suivant :

Mois	Température (°C)
Janvier	12.5
Février	13.1
Mars	12.9
Avril	14.0
Mai	17.2
Juin	21.1
Juillet	24.7
Aout	25.6
Septembre	23.8
Octobre	20.1
Novembre	16.4
Décembre	14.0

Tableau 4 La température mensuelle d’Alger

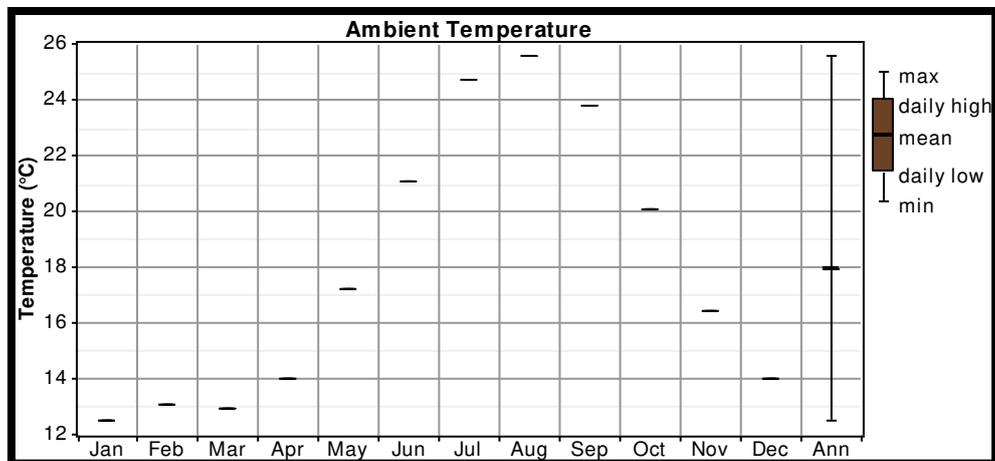


Figure 4 Température mensuelle moyenne d’Alger

Les besoins électriques de l’aéroport sont variés au court de la journée, en effet nous avons fait une estimation de la consommation en se basant sur ses équipements.

8 Profils de la charge de l'aéroport

Les besoins énergétiques du cite attiens une puissance de 5MW, cette consommation est journalière représenter dans la figure ci-dessous :

Hour	Charge (KW)	Hour	Charge (KW)
00:00-01:00	4200	12:00-13:00	4600
01:00-02:00	4300	13:00-14:00	4700
02:00-03:00	4300	14:00-15:00	4800
03:00-04:00	4500	15:00-16:00	4700
04:00-05:00	4800	16:00-17:00	4800
05:00-06:00	4800	17:00-18:00	4900
06:00-07:00	4900	18:00-19:00	4950
07:00-08:00	4850	19:00-20:00	4950
08:00-09:00	4950	20:00-21:00	4950
09:00-10:00	4950	21:00-22:00	4950
10:00-11:00	4960	22:00-23:00	4950
11:00-12:00	4980	23:00-00:00	4850

Tableau III.5: La consommation journalière de l'aéroport

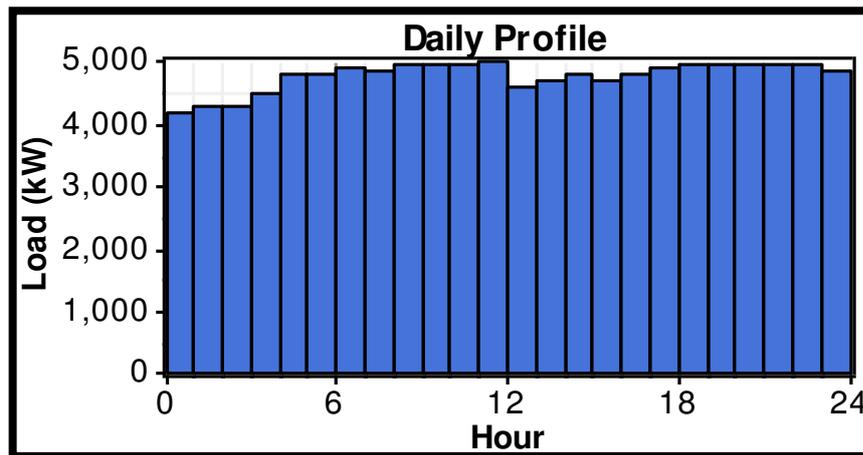


Figure 5 profile de la consommation journalière (KW/h)

Nous pouvons voir sur la figure (III.7) l'évolution mensuelle de la puissance sur une année

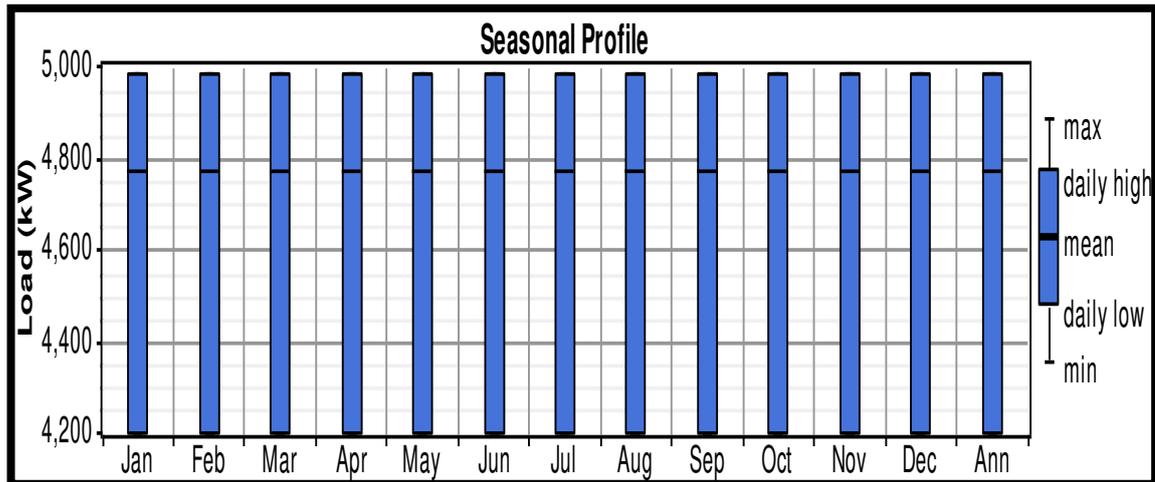


Figure 6 Evolution mensuelle de la consommation électrique pour nouvelle Aéroport d'Alger.

9 Caractéristiques techniques des composants utilisés

9.1 Choix du panneau photovoltaïque

La position des modules photovoltaïques par rapports au soleil influe directement sur leur production énergétique. il est très important de bien les placer pour les utiliser au maximum de leurs possibilités. Deux parameters définissent la position des modules photovoltaïques:

- L'inclinaison: L'angle que fait le panneau avec le plan horizontal.
- L'orientation (azimut): Le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-Ouest).

9.1.1 Choix de l'inclinaison

Le choix de l'inclinaison des panneaux dépend du profil de consommation énergétique de l'utilisateur final, mais aussi du système de stockage considéré.

Si stockage saisonnier est utilise, l'inclinaison des panneaux solaires est fixée de manière à maximiser la capitation de l'énergie sur l'année.

Dans le cas du stockage journalier, l'inclinaison est alors fixée de manière à maximiser la captation de l'énergie durant les periods les plus défavorables en termes de disponibilité de la ressource renouvelable associée à une forte consommation de l'utilisateur final. En

l'occurrence est faible (journées d'ensoleillement courts, conditions météorologiques défavorables) tandis que la consommation est plus importante ((44)).

9.1.2 Choix de l'orientation

L'azimut permet d'ajuster la captation au niveau journalier. L'irradiation solaire maximale survenant généralement le midi (Soleil au Zenith), une orientation plein sud (dans l'hémisphère nord) permet donc de collecter le maximum d'énergie captée par le panneau, si les besoins d'un utilisateur sont plus importants le matin, on préférera orienter les panneau, au sud-est pour maximiser la captation à cet instant de la journée ((44)).

Pour le dimensionnement de notre système on a choisi une orientation en plein Sud, c'est-à-dire à azimut de 0°.

10 Caractéristiques du panneau photovoltaïque

Le panneau solaire photovoltaïque : dans la tables des couts on rentre le cout a l'achat est de 2495s/kW. Vue que notre courbe de charge a un pique de 5100 KW qui signifie la demande en électricité est importante, donc notre choix de module est basé sur ça et sur le coté économique. Notre module choisi est de 280w crête de cellules monocristallin, destiné aux installations de forte puissance avec un coefficient tension-température favorable pour une utilisation à des températures élevées, et possède des performances exceptionnelles à faible irradiation et sensibilité élevée à tout le spectre solaire, et face supérieure en verre trempé à haute transmissibilité pour une rigidité accrue et une excellente résistance aux impacts.

Tension de circuit ouvert	43.2V
Tension de puissance maximale	36V
Courent de court-circuit	8.55A
Courant de puissance maximale	7.78A
Température de fonctionnement	-40°C a +80°C
Efficacité	17%
Dimensions	1956*992mm
Poids	25 kg

Tableau 5 Caractéristiques du panneau solaire

11 Caractéristiques des batteries

Les batteries choisies pour le stockage sont de type Hoppeke 20 oPzS dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :

Type de courant délivre	Continue (DC)
Capacité nominal	1156Ah
Voltage nominal	6v
Etat de charge minimal	40%
Courant de charge max	41A
Rendement	80%
Coût	1200S

Tableau 6 Caractéristiques de la batterie

12 Caractéristiques du convertisseur

Chaque système contenant à la fois des éléments à courant continu et à courant alternatif doit être doté d'un convertisseur. Dans la table des détails à considérer on donne les puissances qui seront utilisées pour la simulation. On rentre son coût à l'achat (711S/kW), son coût de remplacement et le même, et son coût d'opération et de maintenance 7S/KW. Les coûts d'opération et de maintenance sont estimés à 1% de l'investissement par an.

13 Caractéristiques du groupe diesel

Le groupe diesel : dans la bibliothèque de Humer on clique sur l'icône de groupe diesel, dans la table des coûts on rentre le coût du groupe diesel à l'achat est de 540s/kW et son coût de remplacement est le même coût à l'achat. Le prix du Diesel (dans notre cas nous avons pris le prix national), dans l'onglet fuel nous avons fixé le prix du diesel à 0.35S/L.

14 Optimisation du système

Le but des procédés d'optimisation du système est de déterminer la valeur optimale de chaque composant pour la meilleure solution de dimensionnement de notre système.

Les variables de dimensionnement qu'il faut introduire dans notre simulation sont :

- ✓ La puissance crête de la surface photovoltaïque.
- ✓ La puissance nominale des convertisseurs AC/CC.
- ✓ Générateur Diesel.
- ✓ Capacité des batteries.

Dans le processus d'optimisation, HOMER simule plusieurs possibilités de dimensionnement et trie les meilleurs résultats pour chaque scénario, selon le point de vue technique, environnementale et économique.

15 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales données nécessaires pour faire le dimensionnement du système hybride PV-Diesel capable de fournir de l'énergie nécessaire pour alimenter la charge. Les résultats de cette simulation seront présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE VI

Simulation et résultat

1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les résultats de la simulation d'un système hybride PV-diesel. Les résultats sont obtenus à partir d'une analyse technique et économique effectuée sous le logiciel HOMER. Pour cela nous avons considéré trois scénarios pour subvenir aux besoins de l'aéroport d'Alger

2 La configuration du système

La simulation effectuée par HOMER donne une liste de plusieurs possibilités des systèmes à installer, dont le tri des possibilités est basé sur un critère économique. Tous ces systèmes permettent d'alimenter l'aéroport durant toute l'année. Pour notre étude nous avons proposé quatre scénarios cités ci-dessous :

- **1^{er} scénario** : Diesel seul isolé du réseau et sans stockage.
- **2^{em} scénario** : PV-Diesel isolé du réseau et sans stockage.
- **3^{em} scénario** : PV-Diesel isolé du réseau et avec stockage.

2.1 Le Scénario 1 : Groupe diesel seul isolé du réseau et sans stockage

Dans cette partie, nous allons étudier la configuration où l'installation est composée uniquement d'un GD, tous les besoins énergétiques du site sont assurés par ce dernier. Le pique de la charge est de 5Mw.

Le schéma ci-dessous représente les différents composants du système selon HOMER :

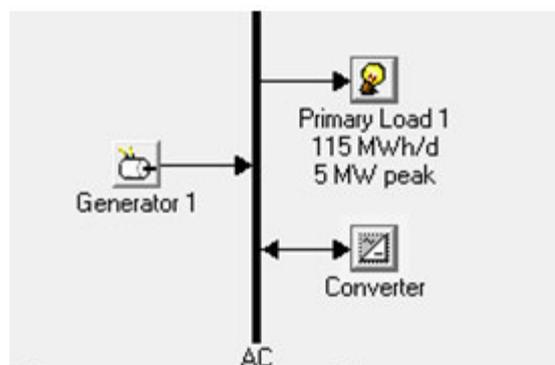


Figure 1 Schémas des composants de la 1^{ère} configuration

2.1.1 Système optimale

Après simulation, HOMER a donné une liste des systèmes possibles dont l'optimal afin de minimiser le coût total de l'installation sur les 20 ans. Le résultat est représenté sur la figure ci-dessous :

Label (kW)	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Diesel (L)	Label (hrs)
5000		\$ 6,000,000	55,911,772	\$ 61,911,716	1.480	0.00	0.37	13,960,...	8,760

Tableau 1 Le système optimal des configurations de 1ème scénario.

2.1.2 Production électrique mensuelle moyenne

L'histogramme ci dessous représente la production électrique moyenne mensuelle délivrée par le GD. A partir des ces résultats, on remarque que son fonctionnement est maximale, il assure tous les besoins électriques du site (Dar El-Beida) avec une puissance de 5000kw pendant toute l'année.

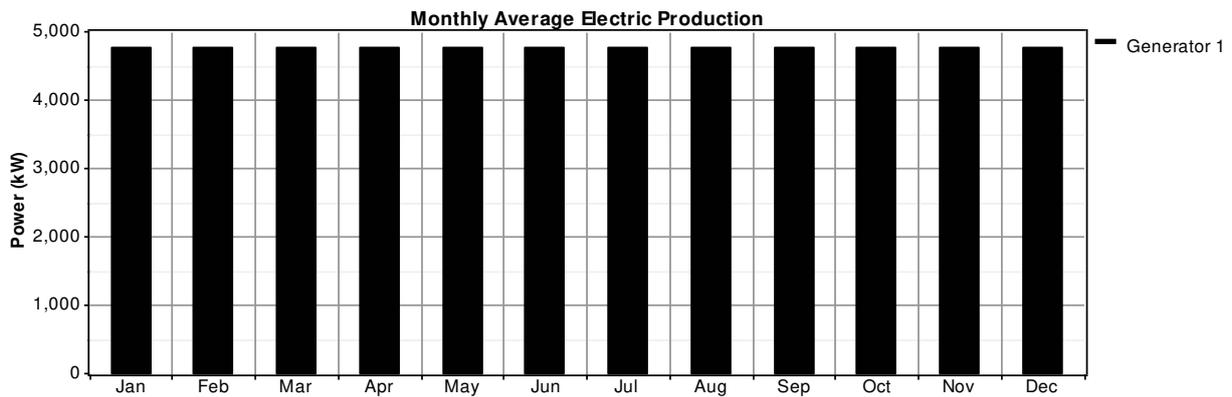


Figure 2 Production électrique moyenne mensuelle

2.1.3 Coût du système

L'étude économique de ce système (générateur diesel seul) sont calculés à une durée de vie de de 20 ans. Les résultats de la répartitions des couts sont représentés dans l'histogramme suivant :

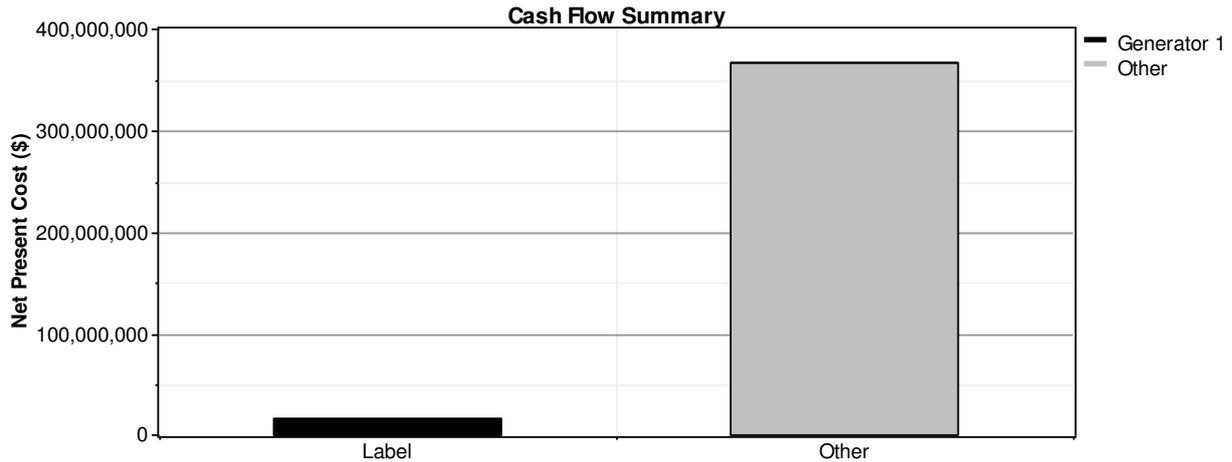


Figure 3 Répartition du coût total du projet

Le tableau (IV.1) représente la quantité de production de GE, le coût global de l'installation, l'énergie annuelle produite par coût spécifique de l'énergie, l'excès d'électricité, la consommation du fuel et les émissions des gaz polluants.

Résultat	Valeur	Unité
Diesel	100	%
PV	0	%
Capital	6000000	\$
Energie totale annuelle produite	41826656	KWh/ans
Coût spécifique de l'énergie	0.2	\$/KWh
Excès d'électricité	0	%
Emission total	37755097	Kg/ans
La consommation du fuel	13960994	L /ans

Tableau 2 Résultats de la simulation de la 1ème configuration

2.2 Scénario 2: générateur PV-Diesel isolé du réseau et sans stockage

Nous allons considérés un système hybride PV-diesel de capacité de 5Mw qui est égale au pic de la charge à alimenter, délivrant cette puissance vers un convertisseur de même puissance. Pour déterminer l'effet de l'inclinaison des panneaux, on à considérer plusieurs valeurs de l'angle d'inclinaison.

Le schéma ci-dessous représente les différents composants du système selon HOMER :

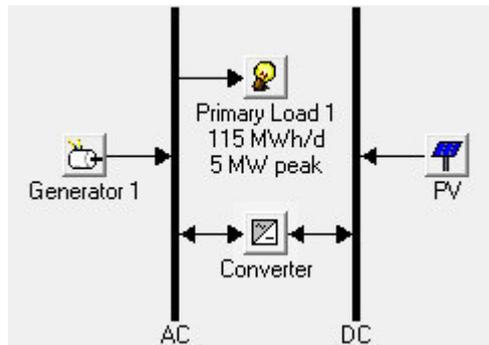


Figure 4 Schéma des comportements de la 2ème configuration

2.2.1 Système optimale :

La simulation par HOMER nous donne la configuration des meilleurs résultats d'un système hybride PV-diesel sans stockage pour les différentes inclinaisons dont l'optimal qui est représenté sur la figure suivante :

	PV (kW)	Label (kW)	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Diesel (L)	Label (hrs)
	9000	5000	2000	\$ 15,080,000	43,112,888	\$ 58,192,848	1.391	0.30	0.23	12,253,...	8,760

Tableau 3 Le système optimal des configurations de 1ér scénario.

2.2.2 Production électrique mensuelle moyenne

La figure suivante représente la limite moyenne mensuelle de la production journalière de d'énergie d'origine renouvelable pour le générateur PV en fonction du gisement solaire et d'une énergie fossile pour générateur diesel. La puissance totale pour chaque mois est représentée sur le diagramme suivant :

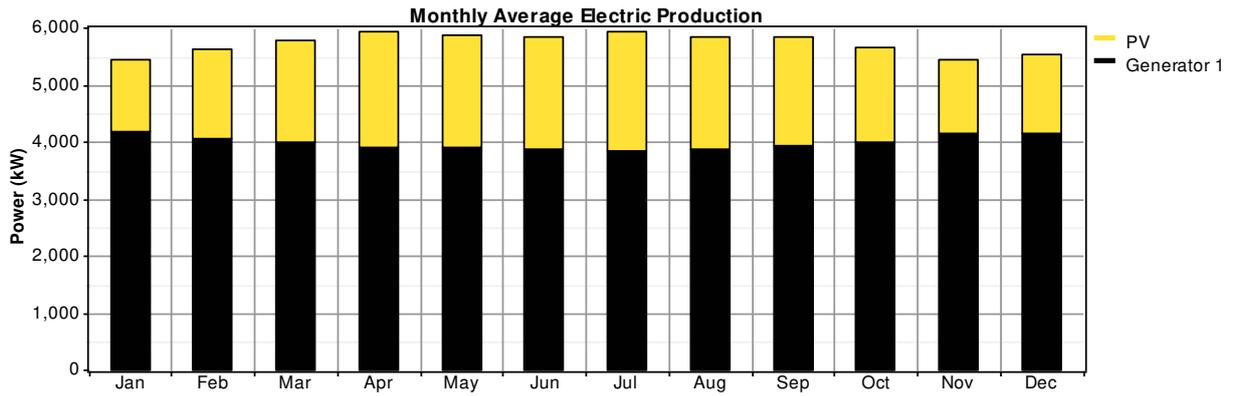


Figure 5 Répartition de la production d’électricité moyenne mensuelle.

A partir des ces résultats, on remarque que l’énergie renouvelable est de 30% de l’énergie annuelle produite sont assurés par la générateur photovoltaïque, tandis que 70 % cette énergie est produite par le générateur Diesel pour une charge de 5000kw.

La production électrique assurée par le photovoltaïque n’est pas constante, cela est dû à la variation d’ensoleillement d’un mois à l’autre, pour les mois de juin, juillet, août et septembre qui représente 2900 KW. Par contre la consommation moyenne du générateur diesel est plus importante durant le saison d’hiver de valeur 4100KW.

2.2.3 Coût du système

L’histogramme suivant représente la répartition des coûts pour les différents composants du système hybride (PV/diesel).

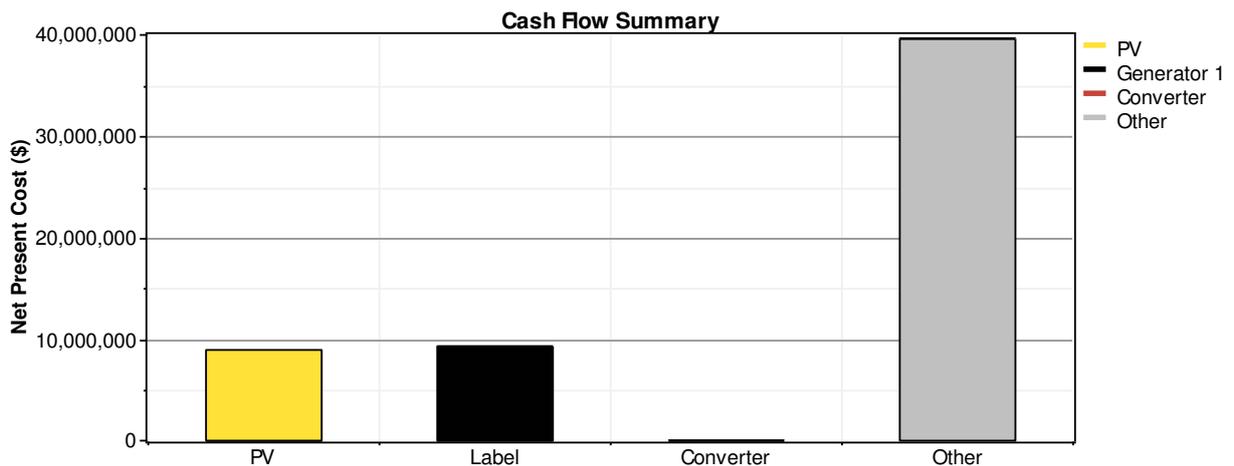


Figure 6 Répartition du coût total du projet

On remarque dans cette configuration que le prix de diesel est augment par rapport au prix de photovoltaïque.

Le tableau représente les résultats obtenus par la simulation. La quantité de produite par chaque élément, Le coût global de l'installation, le prix du KWh et l'excès d'électricité qui peut être évité avec l'ajout des batteries, et la consommation du fuel.

Résultat	Valeur	Unité
Diesel	70	%
PV	30	%
Capital	15080000	\$
Energie totale annuelle produite	50248928	KWh/ans
Coût spécifique de l'énergie	0.740	\$/KWh
Excès d'électricité	15.3	%
Emission total	33138164	Kg/ans
La consommation du fuel	12253755	L/an

Tableau 4 Résultats de la simulation de la 2ème configuration

2.3 Scénario3: générateur PV-Diesel isolé du réseau et avec stockage

Dans cette configuration notre système est constitué des générateurs PV d'une puissance de générateur diesel, et des batteries de capacité 2500Ah, et convertisseurs de 5000Kw. La configuration est représentée par le schéma de la figure (7)

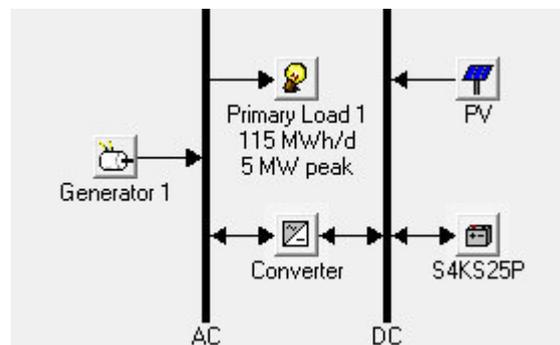


Figure 7 Schéma des comportements de la 3ème configuration

2.3.1 Système optimale

Après simulation, HOMER a donné une liste des systèmes possibles dont l'optimal qui est représenté sur la figure suivante :

	PV (kW)	Label (kW)	H2500	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Diesel (L)	Label (hrs)
	120...	4500	500	4000	\$ 18,160,000	60,178,168	\$ 78,338,112	1.893	0.35	0.24	10,899,...	8,760
	120...	4500	500	5000	\$ 18,200,000	60,178,768	\$ 78,378,712	1.894	0.35	0.24	10,899,...	8,760

Tableau 5 Le système optimal des configurations de 3ém scénario.

2.3.2 Production électrique mensuelle moyenne

A partir des ces résultats, on remarque que 35% des besoins électriques du site (Dar El-Beida) qui present 1750KW sont assurés par la générateur photovoltaïque et 65% de production 3250KW par le générateur Diesel avec une puissance de 4500kw.

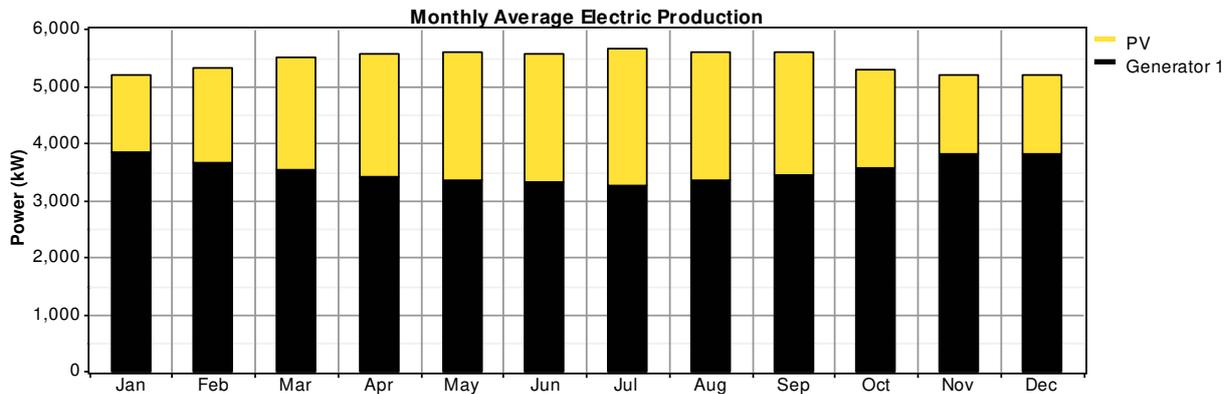


Figure 8 : Production électrique moyenne mensuelle

La fraction du PV est de 35%, c'est une moyenne mensuelle qui n'est pas constante durant toute l'année, elle varie en fonction de la variation d'ensoleillement, elle atteint la valeur de 2300 KW pendant le mois le plus ensoleillé (été) par contre atteint une production importante par le Diesel de valeur 3900KW des mois d'hiver et faible production par le générateur Diesel pour le mois ensoleillé. La moyenne annuelle varie au cours de l'année et dépend de l'ensoleillement du site.

2.3.3 Coût du système

L'histogramme suivant représente la répartition des coûts pour les différents composants du système hybride (PV/diesel).

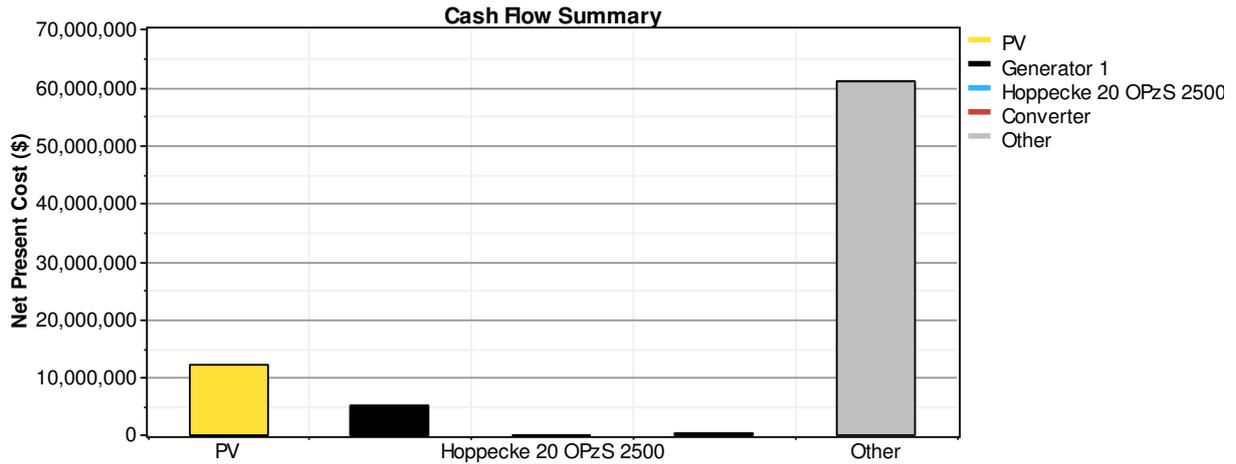


Figure 9 Répartition du coût total du projet

On remarque que le générateur photovoltaïque présente le coût le plus élevé par rapport à groupe électrogène, dans ce système le coût de PV représente 12 000 000 \$ et le coût de GE représente 5 000 000 \$.

Résultat	Valeur	Unité
Diesel	65	%
PV	35	%
Capital	18160000	\$
Energie totale annuelle produite	47671744	KWh/ans
Coût spécifique de l'énergie	0.801	\$/KWh
Excès d'électricité	10.4	%
Emission total	29475900	Kg/ans
La consommation du fuel	10899531	L/ans

Tableau 6 Résultats de la simulation de la 3ème configuration.

Le tableau (IV.6) représente les résultats obtenus par la simulation. Le coût global de l'installation, le prix du KWh et l'excès d'électricité et la consommation du fuel.

3 Comparaison entre les quatre configurations

3.1 Du côté économique

Les coûts de chaque système sont illustrés dans le tableau suivant

	Système 1 Diesel seul	Système 2 PV-Diesel sans stockage	Système 3 PV-Diesel avec stockage
Total du coût net présent	61911720	58192848	78338104
Le coût spécifique de l'énergie	0.05	0.740	0.801

Tableau 7 Les coûts de chaque système

Sur les figure suivant représentées les configurations classées par leur coût

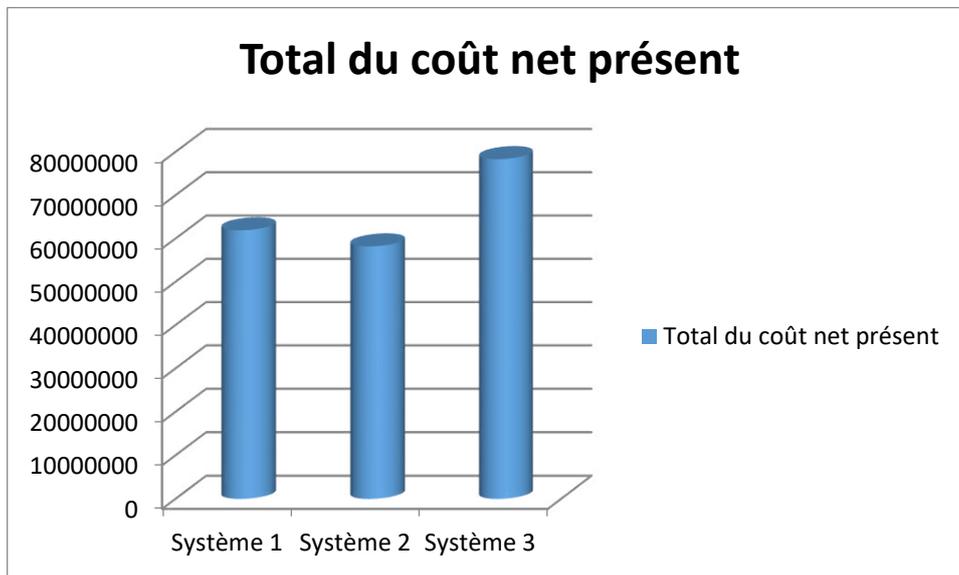


Figure 10 Comparaison des coûts totaux des quatre systèmes.

D'après le tableau on voit que le système hybride (PV-Diesel) sans stockage le coût total de l'installation le moins faible par rapport à la première configuration et la deuxième.

IV.5.2 : Du coté écologique :

Les quantités des différents polluants émis par les trois configurations son montrés dans le tableau (IV.6) et représentés sous forme d'histogrammes sur les figure (IV.19).

	Configuration 1 Diesel seul	Configuration 2 PV-Diesel sans stockage	Configuration 3 PV-Diesel avec stockage
Polluants	Emissions Kg/ans		
Dioxyde de carbone	36763892	32268170	28702052
Monoxyde de carbone	90746	79649	70847
Hydrocarbures imbrûlés	10052	8823	7848
Matières particuliers	6841	6004	5341
Dioxyde de soufre	73828	64800	57639
Oxydes d'azote	809738	710718	632173
Totale	37755097	33138164	29475900

Tableau 8 Les polluants créent par les trois systèmes

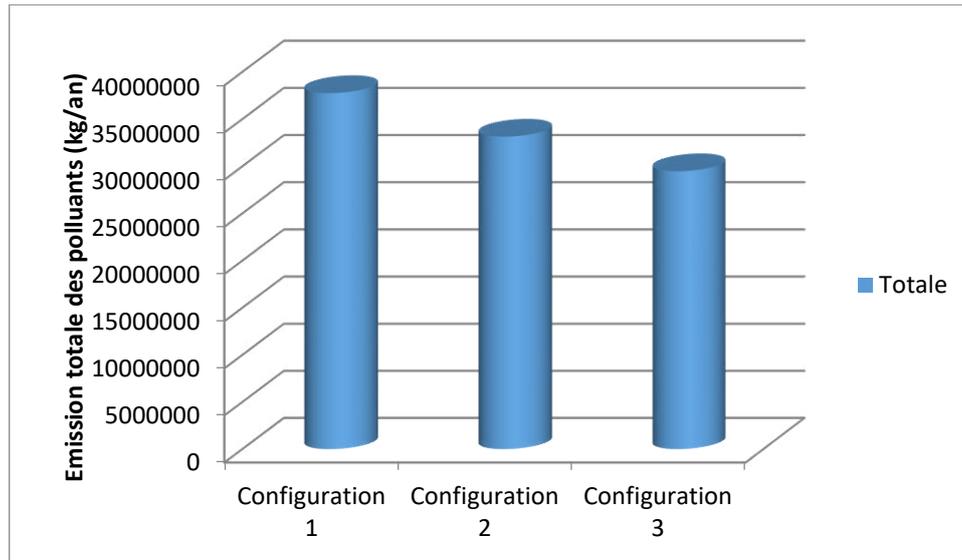


Figure 11 Comparaison des quantités des émissions totales pour chaque système

- ❖ La comparaison des quantités de chaque polluant pour les trois systèmes est illustrée dans les histogrammes suivants

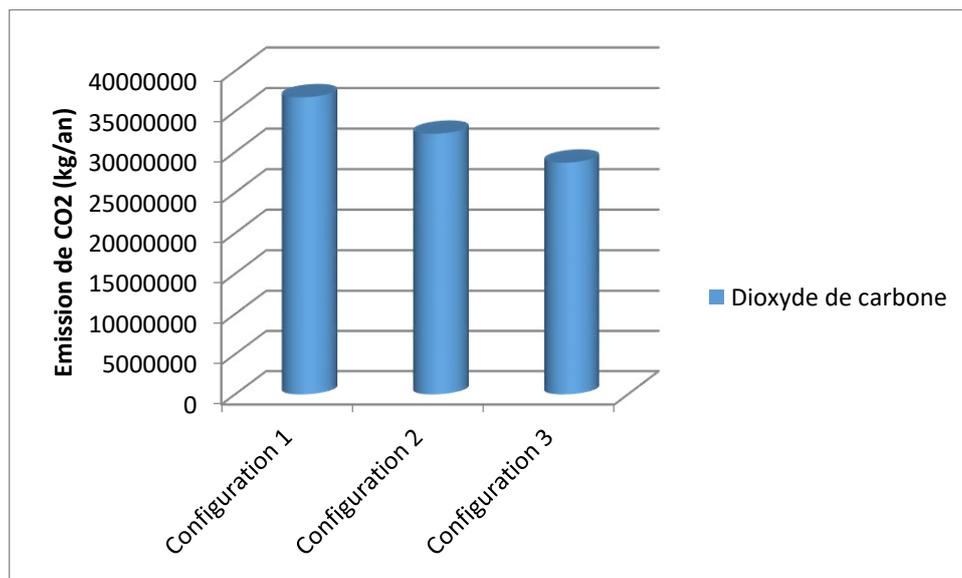


Figure 12 Comparaison des quantités des émissions de CO₂ créé par chaque système

Dans l'histogramme ci-dessus on remarque que la première configuration (Diesel seul) émet une grande quantité de CO₂ dans l'environnement due à la consommation importante de générateur diesel.

Par contre dans la troisième configuration (PV-Diesel avec stockage), La quantité des émissions du CO₂ a diminué de 8279197 Kg/ans par rapport à la première configuration.

Et pour la deuxième configuration (PV/diesel) la quantité des émissions du CO₂ à diminué de 4616933Kg/ans par rapport à la première configuration (Diesel seul).

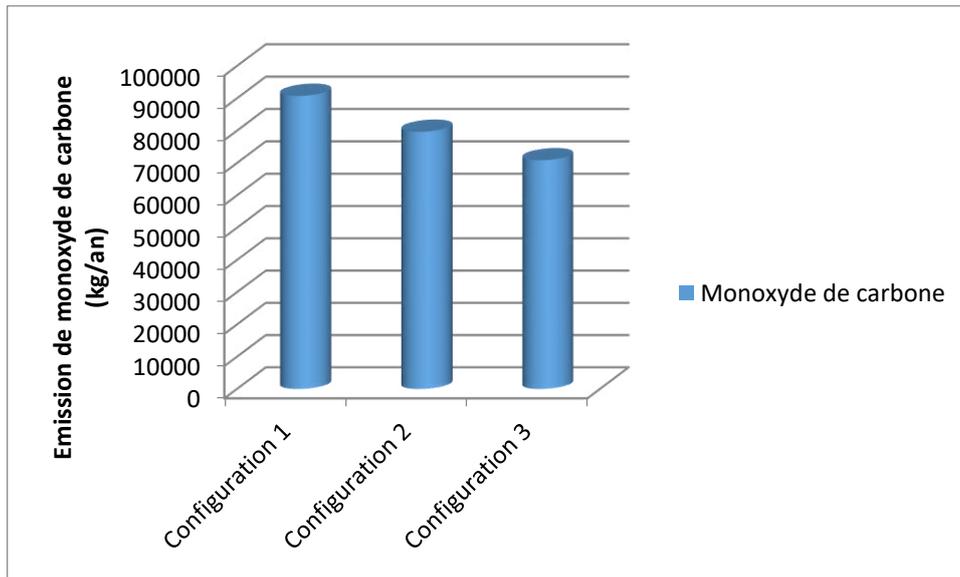


Figure 13 Comparaison des quantités de monoxyde de carbone pour chaque système

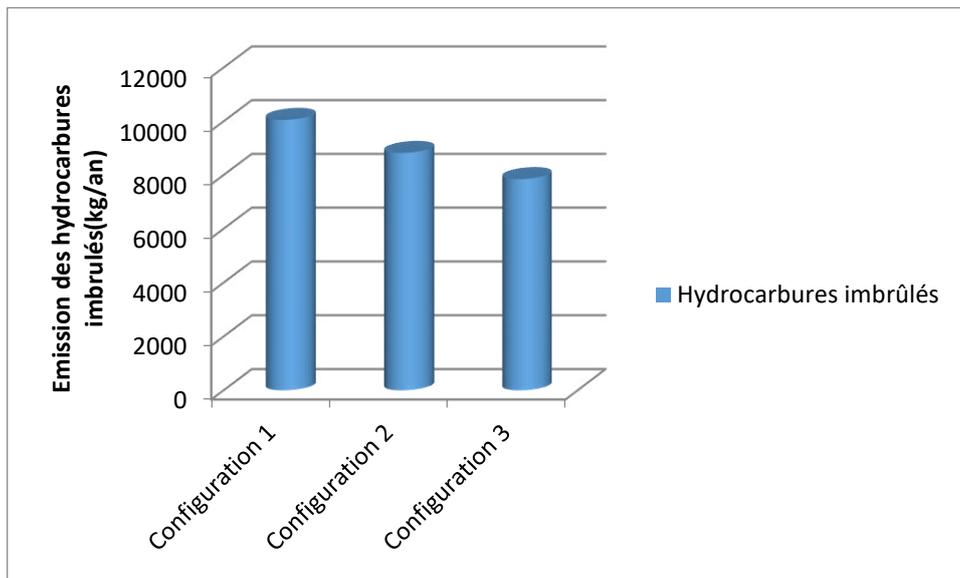


Figure 14 Comparaison des quantités des émissions des hydrocarbures imbrûlés pour chaque système

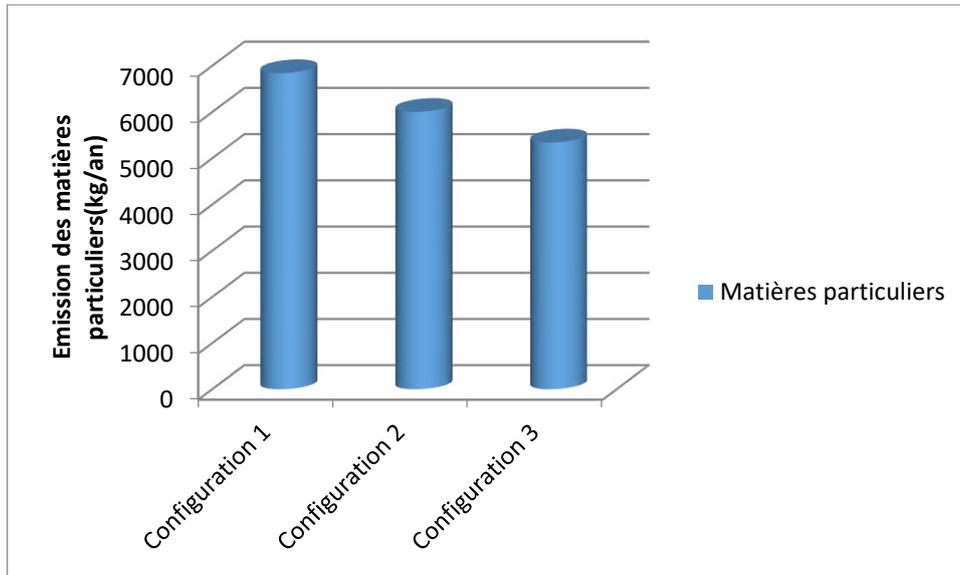


Figure 15 Comparaison des quantités des émissions des matières particulères pour chaque système

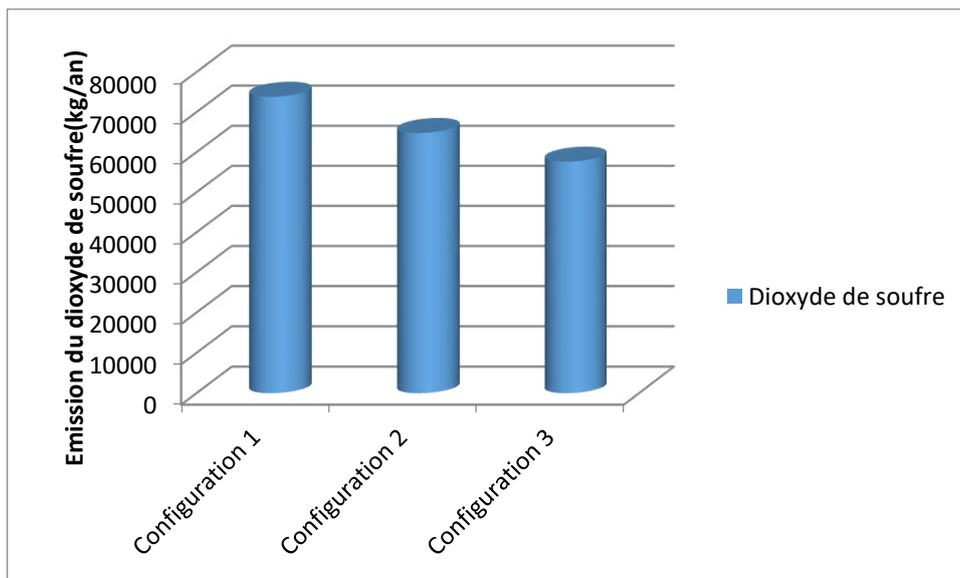


Figure 16 Comparaison des quantités des émissions du dioxyde de soufre pour chaque système

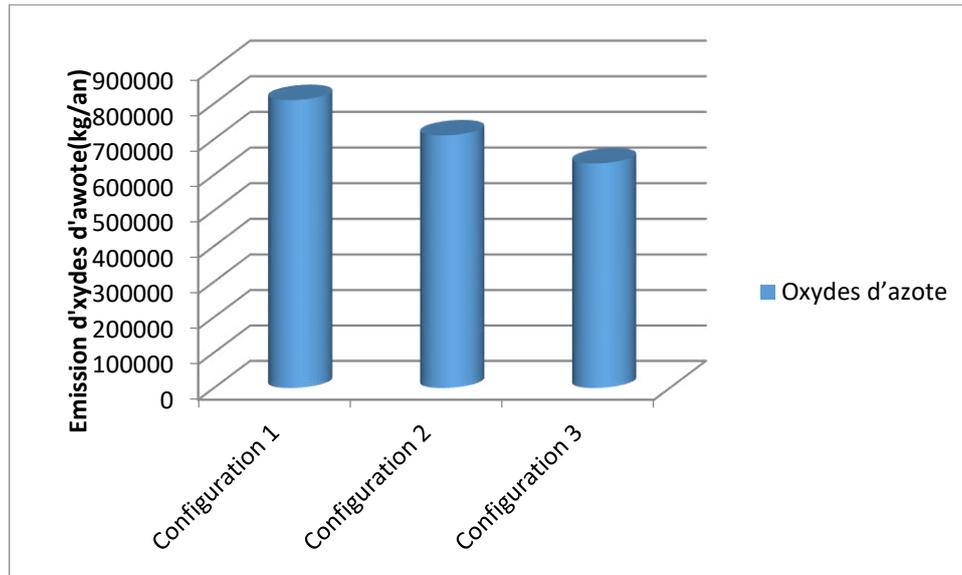


Figure 17 Comparaison des quantités des émissions d'oxyde d'azote pour chaque système

D'après les histogrammes correspondant à différentes configurations on voit que les émissions du système qui utilise beaucoup le diesel seul sont plus élevées par rapport aux autres, la troisième configuration a diminué les émissions polluantes d'une quantité très importante (8279197 Kg/ans) ceci dus à la diminution de consommation de fuel. Donc on peut conclure que le système hybride (PV-Diesel avec stockage) est la configuration la plus rentable écologiquement. Les résultats de ces histogrammes ont mis en évidence le rôle des énergies renouvelables pour la réduction des émissions des déchets à effet de serre.

Donc le scénario 3 (PV-Diesel avec stockage) est le meilleur scénario par rapport aux émissions environnementaux , car dans le scénario 2(PV-Diesel sans stockage) on continue toujours à consommer du combustible, donc on continue à avoir les émissions des gaz nocifs , ces derniers qui sont plus importantes dans le scénario1 (Diesel seul) où on utilise que le groupe diesel , alors que dans le scénario 3 nous avons compenser le manque de l'énergie durant la phase nocturne par l'énergie provenant du Diesel.

4 Comparaison des profils de fonctionnement

4.1 Pour le système hybride

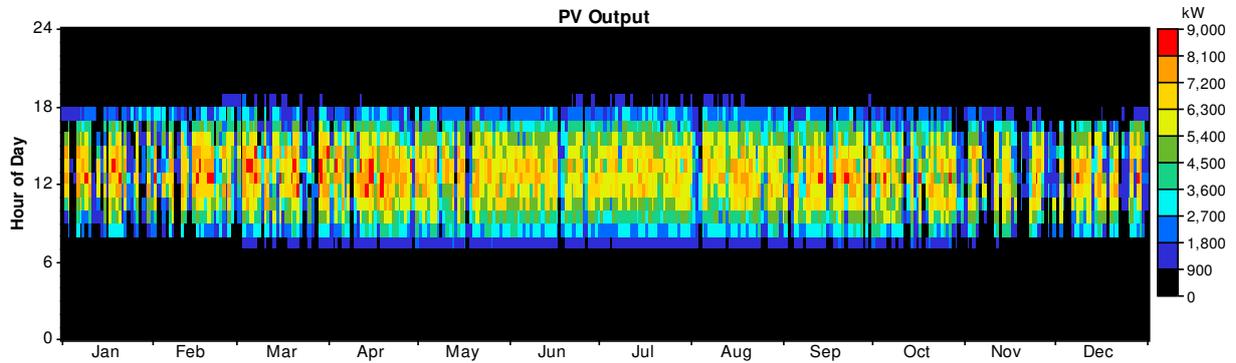


Figure 11 Production journalière du générateur photovoltaïque pour toute l'année.

Le générateur photovoltaïque fonctionne lorsqu'il y a ensoleillement (de 6h à 18h), la puissance à produire change selon les mois elle s'élève pendant les mois où l'ensoleillement est important (Été) et diminue pendant les mois faible ensoleillement (Hiver). Dans notre cas le générateur photovoltaïque fonctionne 4500hr/ans.

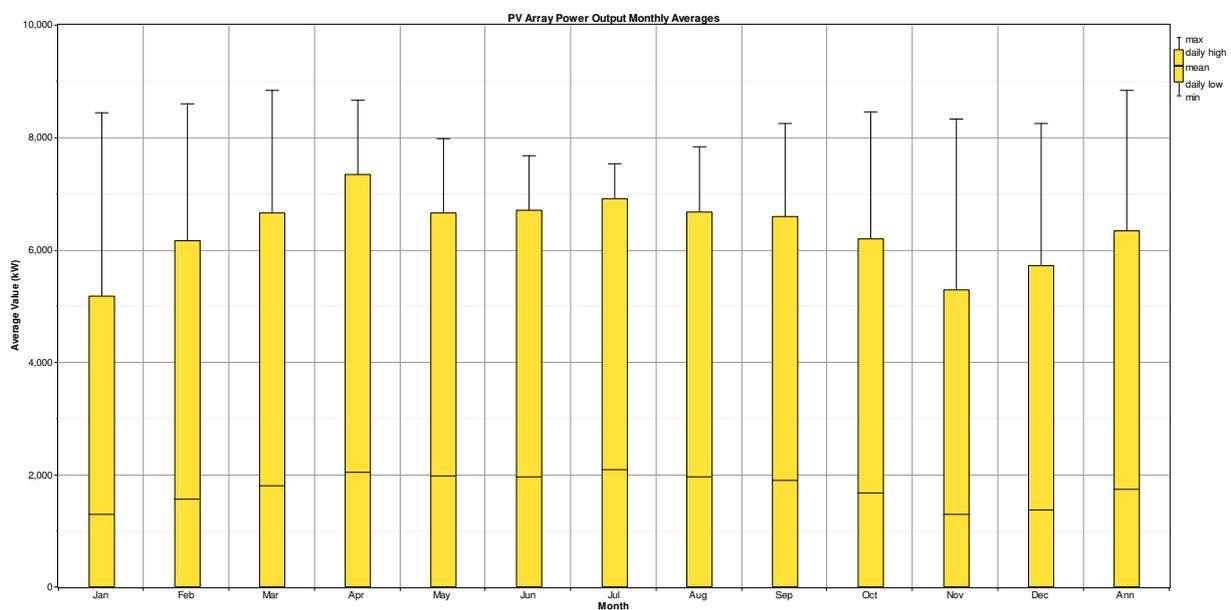


Figure 12 Valeur mensuelle

Les valeurs mensuelle (Figure IV.19) montrent que cet apport du groupe diesel diminue à partir du mois de mars jusqu'au mois de septembre, période où on remarque d'après la production

mensuelle du générateur PV qui dépend du rayonnement solaire incident (Figure IV .20) ainsi le rayonnement global qui est moins par rapport à ce dernier.

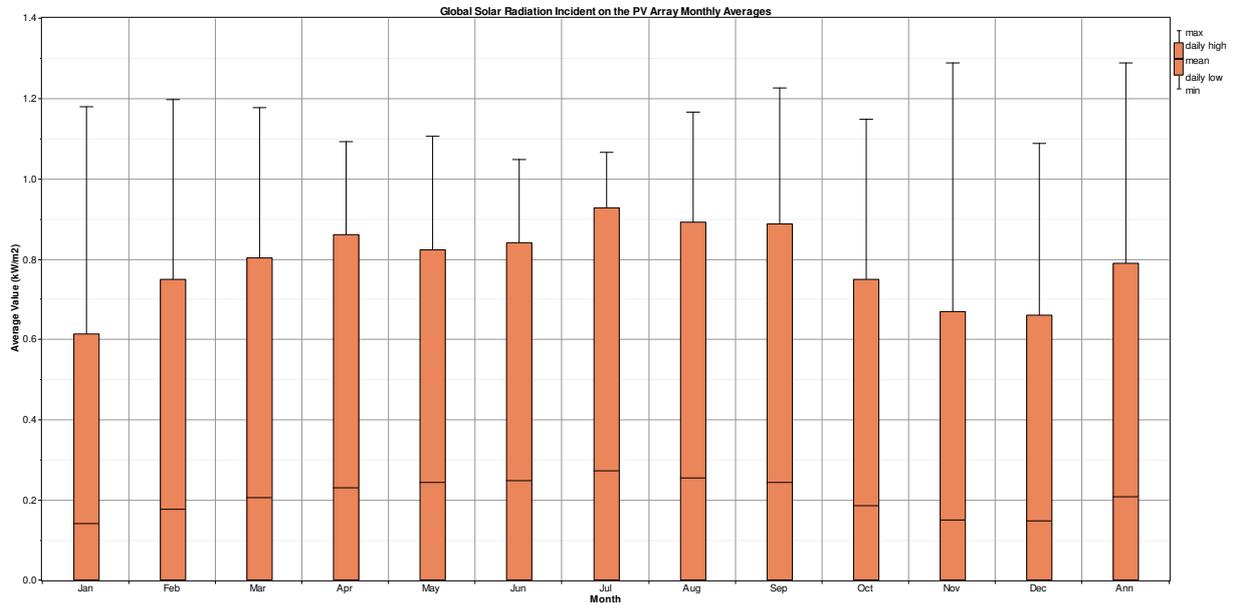


Figure 13 Rayonnement solaire incident

On remarque aussi que le générateur diesel ne délivre jamais le maximum de sa puissance pendant les mois d’hiver car les valeurs du rayonnement solaire sont inférieures à la référence de 1000 w/m².

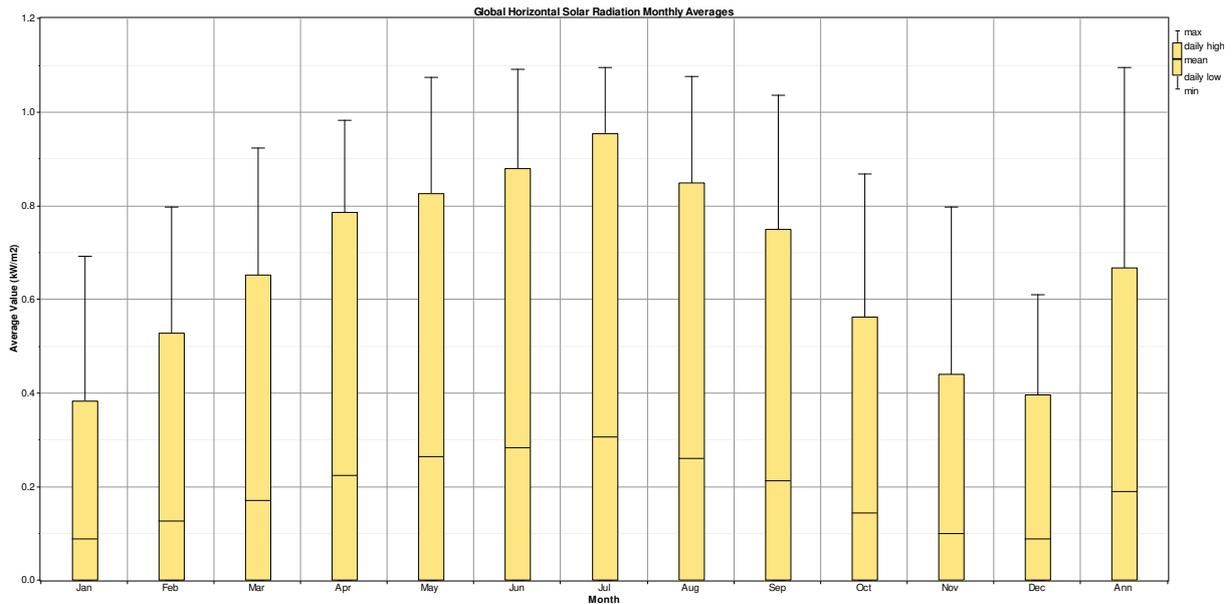


Figure 14 Rayonnement solaire

Aussi pendant l'été à cause des températures supérieures à 25°C qui influence négativement sur le rendement du générateur PV (figure IV.22)

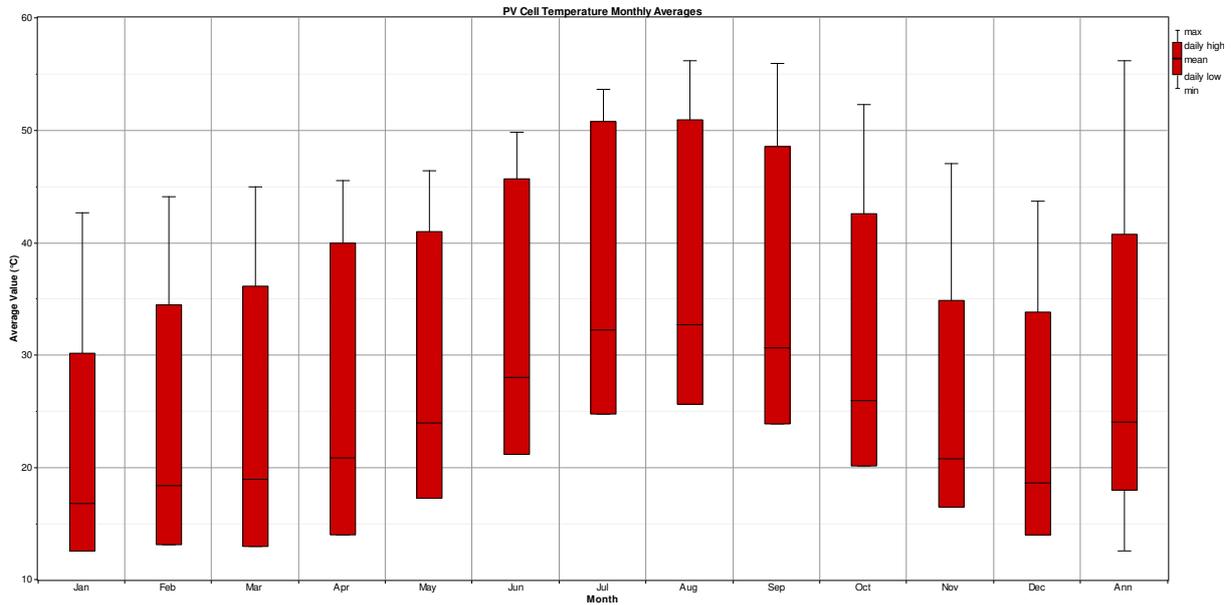


Figure 15 Température ambiante

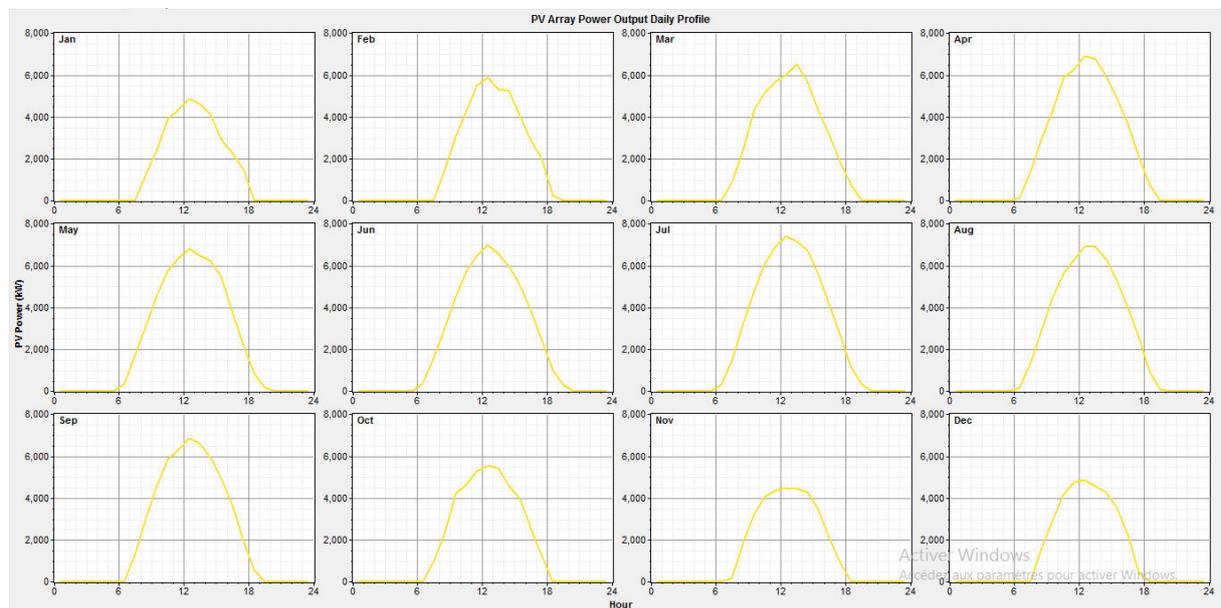


Figure 16 Production de générateur PV de 5000Kw (valeurs horaires)

Aussi les valeurs horaire montrent que cette différence est vraiment importante pendant la nuit où la production du PV est nulle, le générateur Diesel délivre son pic maximal de 5Mw, alors que les valeurs horaire journalière du générateur photovoltaïque varient de 4100Kw en

mois de novembre à 6800Kw en mois de juillet, ces valeurs correspondent au maximum développé à 12h00., ceci montre que le rendement de notre générateur PV diminue par rapport au rayonnement solaire et aussi par rapport à la température de la cellule photovoltaïque, car la puissance nominale doit être atteinte dans des conditions climatiques de rayonnement solaire égal à 1000w/m^2 et une température de $25\text{ }^\circ\text{C}$; et le rendement diminue avec la diminution de rayonnement solaire et avec l'augmentation de la température.

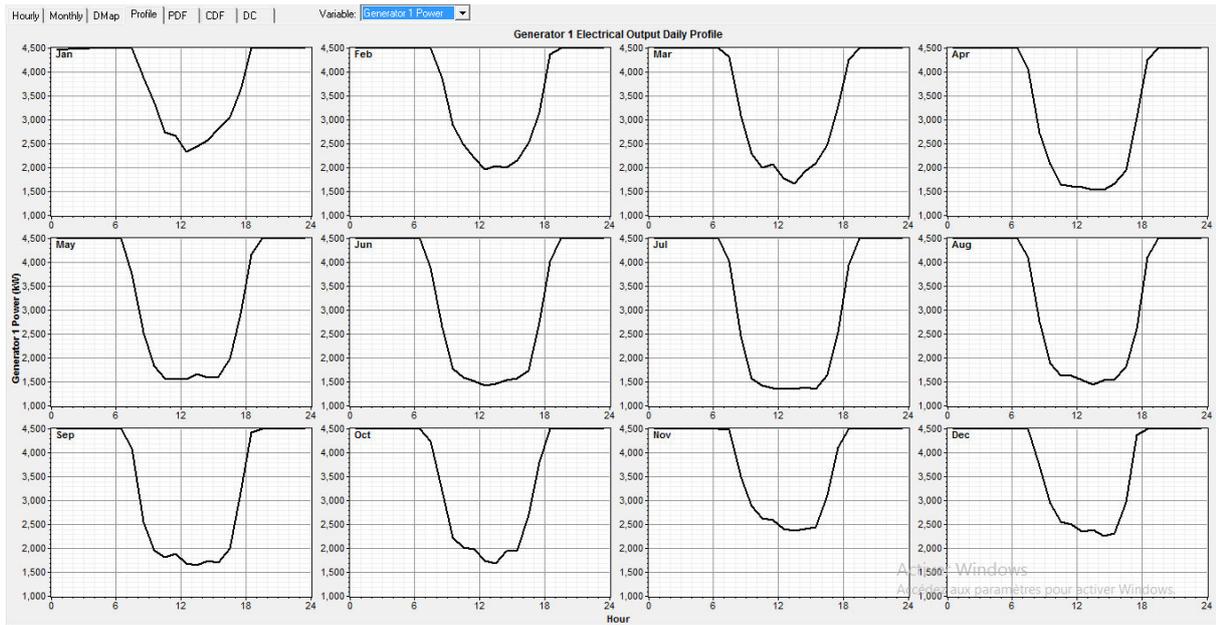


Figure 17 Production de GE de 5000Kw (valeurs horaires)

On remarque que le minimum de puissance développée par le générateur diesel correspond au maximum développée par le générateur photovoltaïque. Et l'énergie développée par le diesel durant la nuit correspond à la charge à délivrer.

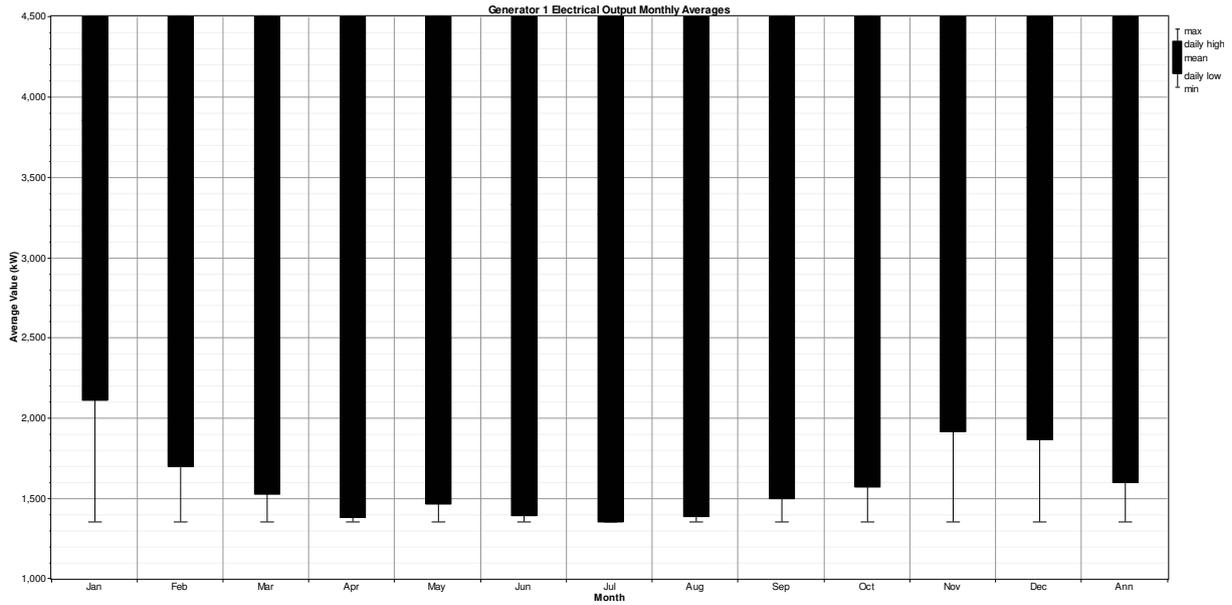


Figure 18 Production de Groupe Diesel

D'après la (figure 25), Groupe Diesel, peut produire durant la nuit pendant toute l'année, mais qui peut atteindre des valeurs de 1300 à 1400 kw durant l'été, et de valeurs 1600 à 2200 kw durant l'hive

4.2 Pour le groupe diesel seul

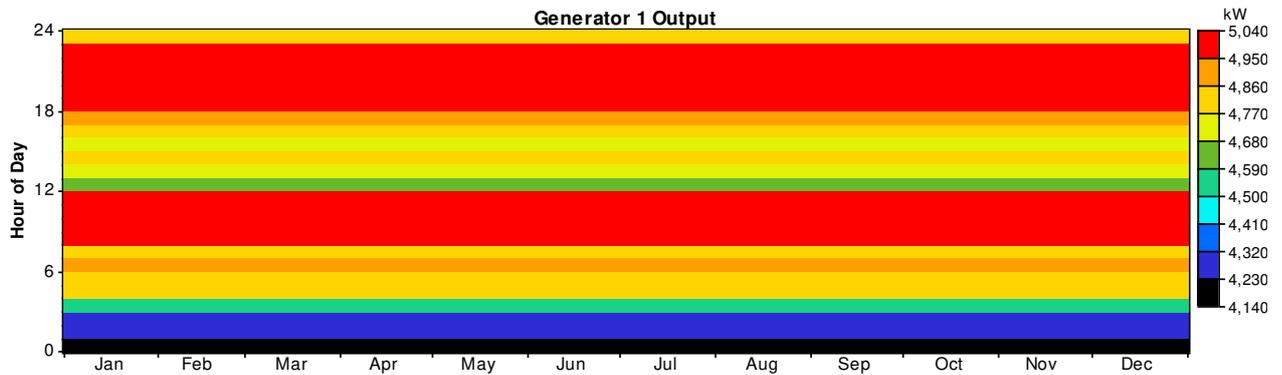


Figure 26 Production journalières du groupe diesel pour toute l'année

A partir de ces résultats, on remarque que la durée de fonctionnement du groupe diesel est de 8760h/ans, il est en fonctionnement permanent durant toute l'année. La représentation de la puissance moyenne journalière délivrée est identique avec la distribution journalière de la charge pour tous les mois. Elle est maximale entre 16h et 17h (la couleur rouge), cela correspondant au pic de consommation.

5 Détermination du nombre de panneaux

Notre dimensionnement du deuxième système hybride est effectué à partir du prototype qui existe au niveau du CREDEG, on a proposé types des panneaux car ça nous aides de justifié notre choix des panneaux qui convient à notre installation. La fiche techniques des deux panneaux est représentée dans les tableaux (III.6)

* Le premier module est de type Polycristallin (Capa) avec une puissance crête de 325w solaire photovoltaïque conçu pour les besoins électriques de grande puissance. Les caractéristiques de ce module sont mentionnées dans le tableau IV.7

Tension de circuit ouvert	46,48V
Tension de puissance maximale	37.49V
Courant de court-circuit	9.14A
Courant de puissance maximale	9.14A
Nombre de cellule en série	72
Efficacité	16.77%
Dimensions	1956*990*40 mm
Poids	21.5kg
Température de fonctionnement	-40°C à +85°C

Tableau 9 Caractéristiques techniques du deuxième panneau

Pour déterminer le nombre des modules on utilise la relation suivante :

Dans un prototype réaliser au niveau du CREDEG, le champ photovoltaïque est de puissance 16800 W comprend 60 module de 280 kw, pour trouver le nombre des panneaux qui correspond à la puissance des champs photovoltaïque 1400kw pour chaque type de module, nous nous sommes basé sur ces valeurs du prototype. On considère que le champ PV du CREDEG représente un panneau de 60 module pour tous les types des modules qui sont représenté ci-dessous.

On applique ce dimensionnement pour les différents modules choisis pour trouver le nombre des panneaux.

$$N_P = P_C / P_P$$

	Module 1	Module 2
Nombre de modules	3158	3664
Nombre de panneaux	10	14
Surface d'un seul panneau	116.186 m ²	116.421 m ²
Surface totale des panneaux	1.161 hect	1.629 hect
Coût du 1 kw	3704.76\$	2495\$
Puissance crête	325W	280W

Tableau 10 Tableau comparatif entre les trois types des modules

D'après le tableau on remarque que pour les modules de grande puissance réduisent la surface du champ et le nombre des panneaux par conséquent c'est rentable économiquement (le prix de 1kw se réduit).

5.1 Choix des batteries

Dans le ce chapitre on a indiqué les caractéristiques technique des batteries utilisé dans la simulation, notre simulation nous a données le nombre des batteries est de 500.

Le premier type de batterie à une capacité moins de la batterie choisi dans la simulation et la deuxième a une capacité élevé de la première batterie choisie dans la simulation.

La capacité d'une batterie est la quantité d'énergie électrique quelle est capable de restituer après avoir reçu une charge complet (Ah), cette capacité est calculer par la formule suivante :

*Batteries de type Trojan :ses caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :

Type de courant délivre	Continue (DC)
Capacité nominal	2500Ah
Voltage nominal	2v
Etat de charge minimal	30%
Courant de charge max	11A
Rendement	86%
Le coût	185S

Tableau IV.11 Caractéristiques des batteries Hoppecke 20 OPzS 2500.

Le dimensionnement d'un tel système d'énergie hybride est toujours nécessaire pour rendre plus compétitive l'intégration des sources d'énergies alternatives dans le bilan des grands systèmes de production d'énergie. Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire concerne de l'hybridation d'une nouveaux aéroport Dar Beida , située à d'Alger .

Dans notre travail, nous avons utilisé le logiciel HOMER qui nous a permis d'avoir trois configurations pouvant répondre aux besoins énergétiques de notre installation.

- La première configuration est constituée du groupe diesel seul.
- La deuxième configuration est de type hybride 30 % PV/ 70% diesel sans batteries.
- La troisième configuration est de type hybride 35% PV/ 65% diesel avec batteries.

Selon une analyse comparative entre les trois configurations basée sur les cotés économique et écologique nous avons déduit que :

- Du coté économique, le système hybride (deuxième configuration) reste la solution la plus rentable contrairement à la troisième qui était la plus défavorable.
- Du coté écologique, la troisième configuration (PV-Diesel avec stockage) représente la solution la plus rentable.

Nous avons alors opté pour la deuxième configuration qui constituait un choix optimal car elle présentait un coût inférieur à celui de la troisième configuration et un taux d'émissions faible par rapport à ceux de la première et la deuxième configuration.

Dans l'objectif d'optimiser d'avantage le choix de configuration, une analyse de sensibilité a été faite en fonction de certains paramètres tels que, le prix de diesel, la variation d'ensoleillement, le type de panneau et la capacité des batteries.

L'Algérie est un pays de pétrole où le combustible se vent à un prix faible, mais l'énergie fossile est une énergie qui s'épuise donc le prix du diesel va augmenter et on sera obligé d'intégrer aux énergies renouvelables ; elles sont disponibles et n'augmentent pas la quantité d'émission des gaz à effet de serre dans l'atmosphère lors de leurs exploitation.

L'Algérie possède un gisement énergétique solaire important ; les systèmes hybrides sont très rentables a long durée.

Nous tenant à dire, à la fin de ce travail, que le stage effectué au niveau du credec nous à permis d'apprendre beaucoup de choses a propos des applications et du développement des énergies propre dans notre pays.

Références

- [1] Yael Thiaux, 'Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides Evaluation des potentiel de la technologie Li-ion', Thèse Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Juillet 2010.
- [2] Julien Labbé, 'L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés', Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, CEP, Sophia Antipolis, Décembre 2006.
- [3] EDF, «La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde », Collection chiffres et statistiques, 9^{ème} inventaire, Observ'ER, France, 2007.
- [4] BONAL, P.ROSSETTI, 'Énergies alternatives», OMNISCIENCE, France, 2007.
- [5] HASSINI née BELGHITRI HOUDA, «modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque», université Abou-bakr belkaid de Tlemcen, 2010.
- [6] J-A. DUFFIE, W-A. BECKMAN, "Solar engineering of thermal processes", JOHN WILEY & SONS, 2^{ème} édition, New York (USA), 1980.
- [7] A.LABOURET, M. VILLOZ, « Énergie solaire photovoltaïque », DUNOD, France, 2^{ème} édition, 2005.
- [8] J-M.COTTIER, A.MERMOUD, M.VILLOZ, J.GRAF, «Centrales photovoltaïques Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l' usage des bureaux d'ingénieurs, office fédéral des questions conjoncturelles », PACER, France, 1996.
- [9] *World Energy Outlook 2009*, International Energy Agency, OECD/IEA, 2009
http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/WEO2009_es_french.pdf
- [10] *World Energy Outlook 2008*, International Energy Agency, OECD/IEA, 2008
http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/WEO2009_es_french.pdf
- [11] R.E.H. Sims, *Renewable energy : a response to climate change*, Solar Energy, Vol.76, N° 1-3, 2004, 9-17.
- [12] *Journal officiel*, 1999 http://www.mem-algeria.org/fr/legis/loi_99-09.htm
- [13] *Journal officiel*, 2004 <http://www.joradp.dz/jo2000/2004/052/FP10.pdf>
- [14] Guidelines to Renewable Energies, Edition 2007.
- [15] CDER, (2015). «Nouveau programme national de développement des énergies renouvelables (2015 - 2030) », document disponible sur site:

<http://portail.cder.dz/spip.php?article4446>, Date de mis en ligne le 24 février 2015.

[16] Bendjamâa Ibrahim, « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », Mémoire de Magister de l'Université de Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen, 2012.

[17] Julien Labbé, « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés », Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, Soutenue le 21 décembre 2006.

[18] Phatiphat Thounthong, Stéphane Raël, and Bernard Davat, «Control Strategy of Fuel Cell and Supercapacitors Association for a Distributed Generation System», IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 54, no. 6, December 2007

[19] Ionel Vechiu, «modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat de l'université du Havre, Soutenue le 15 décembre 2005.

[20] A ysar M.M. Yasin « Distributed Generation Systems Based on Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell structures » Thèse de doctorat, Università Degli Studi di Catania Scuola Superiore di Catania 2012.

[21] [09 L. Stoyanov « Etude de Différentes Structures de Systèmes Hybrides à Sources D'énergie Renouvelables », Thèses de Doctorat, Université Technique de Sofia ,2011.

[22] I.Vechiu « Modélisation et Analyse de L'intégration des Energies Renouvelables dans un Réseau Autonome » ; Thèses de Doctorat, de L'université du Havre, 2005.

[23] Courtecuisse « Supervision D'une Centrale Multi-Source à Base D'éoliennes et Dé Stockage D'énergie Connectée au Réseau Electrique », Thèse de Doctorat. L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.2008.

[24] C. Ashari,M.,Nayar,C.V.,Keerthipala,W.W.L., «Optimum Operation Strategy and Economic Analysis of a Photovoltaic - Diesel - Battery –Mains Hybrid Uninterruptible Power Supply». Renewable Energy, Vol.22, Issues 1-3, pp.247- 254, March 2001.

[25] Caisheng Wang, « Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems », These de Doctorat, Dissertation, Montana State University, July 2006.

- [26] Mr_BERKANI.pdf_Adobe Acrobat Reader DC
- [27] Baghdadi Faiza, 'Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergie renouvelable, Mémoire de Magister, Université de Tizi-ouzou, 2011.
- [28] F.A. Farret and M.G. Simões, *Integration of Alternative Sources of Energy*, John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [29] Zhao J., Wang A., Altermatt P.P., Wenham S.R., Green M.A. "24% efficient silicon solar cells". *Photovoltaic Energy Conversion. Conference Record of the Twenty Fourth. IEEE Photovoltaic Specialists Conference - IEEE First World Conference*, Volume 2, 5-9 Dec. 1994 Page(s):1477 - 1480 vol.2
- [30] Zhao J., Wang A., Campbell P., Green M.A. "A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping". *Electron Devices, IEEE Transactions*, Volume 46, Issue10, Oct.1999, Page(s):1978–1983.
- [31] F.ABDO ◊ «Croissance de couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à basse température pour applications photovoltaïques» ◊ thèse de doctorat ◊ Institut National des Sciences Appliquées de Lyon ◊ 2007
- [32] Jansen K.W., Kadam S.B., Groelinger J.F. "The Advantages of Amorphous Silicon Photovoltaic Modules in Grid-Tied Systems Photovoltaic Energy Conversion". *Conference Record of the IEEE 4th World Conference*, Volume 2, May 2006 Page(s):2363 – 2366
- [33] Del Cueto J.A. "Comparison of energy production and performance from flatplate photovoltaic module technologies deployed at fixed tilt". *Photovoltaic Specialists Conference. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE*, 19-24 May 2002, Page(s):1523 – 1526
- [34] Tina G.M., Abate R. "Experimental verification of thermal behaviour of photovoltaic modules". *Electrotechnical Conference - 14th IEEE Mediterranean*, 5-7 May 2008 Page(s):579 – 584, Digital Object Identifier 10.1109/MELCON.2008.4618497
- [35] A.RICAUD ◊ 'Modules photovoltaïques -Filières technologiques' ◊ Techniques de l'Ingénieur ◊ D3940 ◊ 2009.
- [36] A.LABOURET ◊ P.CUMUNEL ◊ J-P. BRAUN ◊ B.FARAGGI ◊ «Cellules solaire les bases de l'énergie photovoltaïque » ◊ DUNOD ◊ 3^e édition ◊ France ◊ 2001.
- [37] T. R. Mtshali, G. Coppez, S.Chowdhury and S.P. Chowdhury " *Simulation and Modelling of PV-Wind-Battery Hybrid Power System* ", july 2011.
- [38] Victron energy, " *Systèmes sites isolés Systèmes de secours* ", Energie en tout temps en tout lieu.
- [39] F. Baghdadi, " *Modélisation et Simulation des Performances d'une Installation*

Hybride de conversion d'Energies Renouvelables », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.

[40] Vandenberg, M. Systèmes hybrides PV/Diesel pour l'électrification rurale. 26 Mai 2011. Disponible sur < <http://www.club-er.org/upload/DOCAT296.pdf>>

[Consulté le 27 Février 2011]

[41] A.OULD MAHMOUD, « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charges mixtes », Thèse de Doctorat, Université de DAKAR, 2008.

[42] Hussein Ibrahim, Adrian Ilinca, Jean Perron, 'Investigations des différents alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés', Rapport Interne, Laboratoire de Recherche en Energie Eolienne, Septembre 2008.

[43] Bencherif Mohamed, 'Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension', Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen. 2014.

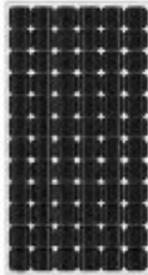
[44] J.LABBE, «L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés», thèse de doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, 2006.

Annexes

ANNEXE (A)



Panneaux monocristal BlueSolar

www.victronenergy.com


BlueSolar monocristal 200 W

- Un coefficient de température de tension faible améliore un fonctionnement à température élevée.
- Performance de faible luminosité exceptionnelle et sensibilité élevée pour illuminer le spectre solaire complet.
- Garantie limitée de 25 ans sur la production et la performance de puissance.
- Garantie limitée de 5 ans sur les matériaux et la qualité d'exécution.
- La boîte de connexion est multifonctionnelle, étanche et scellée, ce qui permet un niveau de sécurité élevé.
- Les diodes de dérivation à haute performance minimisent les chutes de puissances en cas de manque de rayonnement.
- Système avancé d'encapsulation EAV (Éthylène-Acétate de Vinyle) avec une feuille isolante arrière à trois couches respectant les exigences de sécurité les plus rigoureuses pour un fonctionnement sous tension élevée.
- Un cadre anodisé robuste permet de monter facilement les modules sur un toit avec une variété de systèmes de montage standard.
- Verre trempé de la plus haute qualité offrant une transmission élevée et fournissant une résistance à l'impact et une dureté améliorées.
- Modèles à haute puissance avec un système de connexion rapide préfabriqué avec des connecteurs MC4 (PV-ST01).



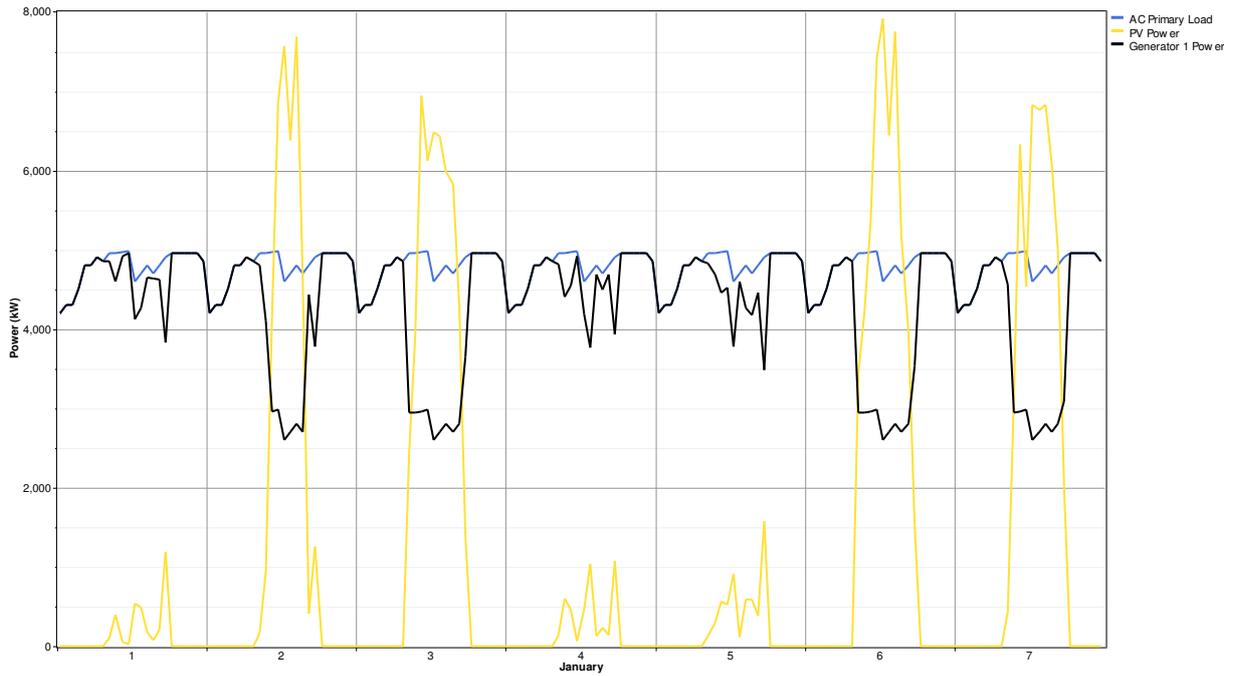
Connecteurs MC4

Numéro de Particelle	Description	Poids	Données électriques sous STC (1)				
			Puissance nominale	Tension de puissance	Courant de puissance	Tension de circuit	Courant de court-circuit
			P _{nom} W	V _{mp} V	I _{mp} A	V _{oc} V	I _{sc} A
SPM030301200	20 W-12 V Mono 430 x 545 x 25 mm séries 2a	2,5	20	18	1,67	22,5	2
SPM030501200	50 W-12 V Mono 630 x 545 x 25 mm séries 2a	4	50	18	2,78	22,2	3,14
SPM030801200	80 W-12 V Mono 1195 x 545 x 25 mm séries 2a	8	80	18	4,45	22,2	4,96
SPM031001200	100 W-12 V Mono 1195 x 545 x 25 mm séries 2a	8	100	18	5,56	22,4	6,52
SPM031501200	150 W-12 V Mono 1480 x 673 x 25 mm séries 2a	12	150	18	8,33	22,4	9,80
SPM031902400	190 W-24 V Mono 1580 x 808 x 25 mm séries 2a	15	190	36	5,44	41,2	5,08
SPM032002400	200 W-24 V Mono 1856 x 992 x 45 mm séries 2a	24	200	36	8,06	45,5	8,56

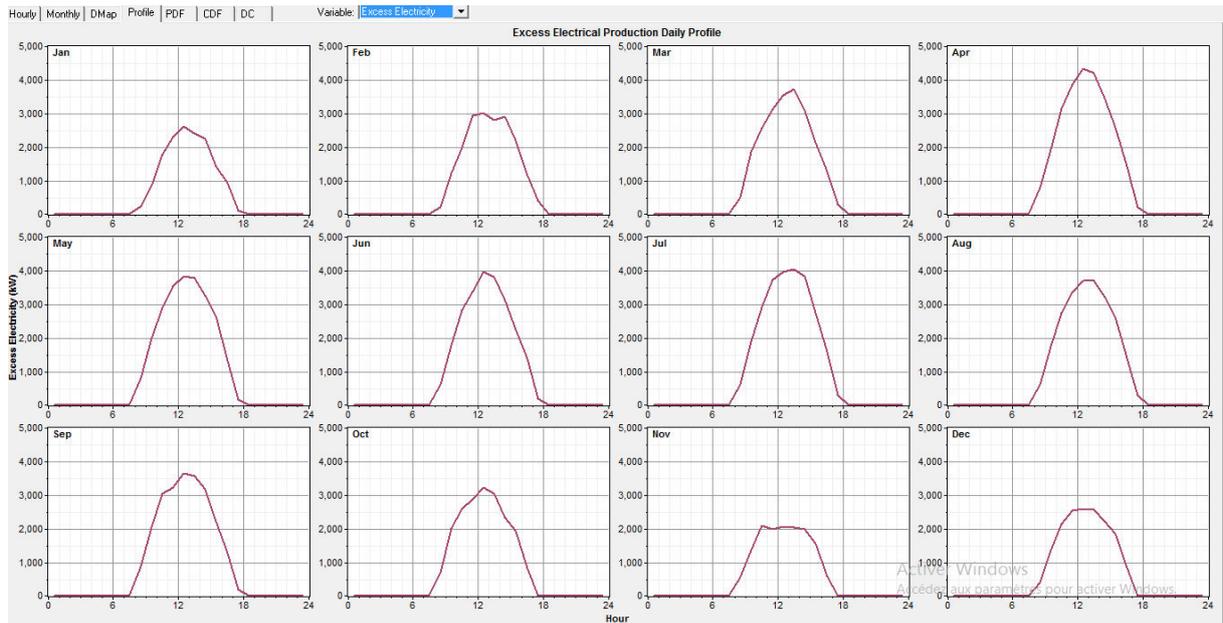
Module	SPM	SPM	SPM	SPM	SPM	SPM	SPM
	030301200	030501200	030801200	031001200	031501200	031902400	032002400
Puissance nominale (+/- 3% tolérance)	20 W	50 W	80 W	100 W	150 W	190 W	200 W
Type de cellule	Monocristal						
Nombre de cellules en série	36			72			
Tension de système maximale (V)	1000V						
Coefficient de température de P _{nom} (%)	-0,46/°C	-0,46/°C	-0,46/°C	-0,46/°C	-0,46/°C	-0,46/°C	-0,46/°C
Coefficient de température de V _{oc} (%)	-0,34/°C	-0,34/°C	-0,34/°C	-0,34/°C	-0,34/°C	-0,34/°C	-0,34/°C
Coefficient de température de I _{sc} (%)	+0,037/°C	+0,037/°C	+0,037/°C	+0,037/°C	+0,037/°C	+0,037/°C	+0,037/°C
Plage de température	-40°C à +85°C						
Capacité de charge maximale en surface	200 kg/m ²						
Résistance à la grille disponible	23 m/s, 7,53 g						
Type de boîte de connexion	PV-LH001		PV-LH008			PV-B002	
Longueur des câbles/Type de connecteur	Pas de câble		900 mm MC4				
Tolérance de sortie	+/- 2 %						
Cadre	Aluminium						
Garantie du produit	5 ans						
Garantie sur les performances électriques	10 ans 90 % + 25 ans 80 % de production de puissance						
Unité d'emballage la plus petite	1 panneau						
Quantité par palette	100		40			20	

1) STC: Conditions de test standard - 1000 W/m², 25°C, AM 1.5, 0-60° - mesure d'air 1.2

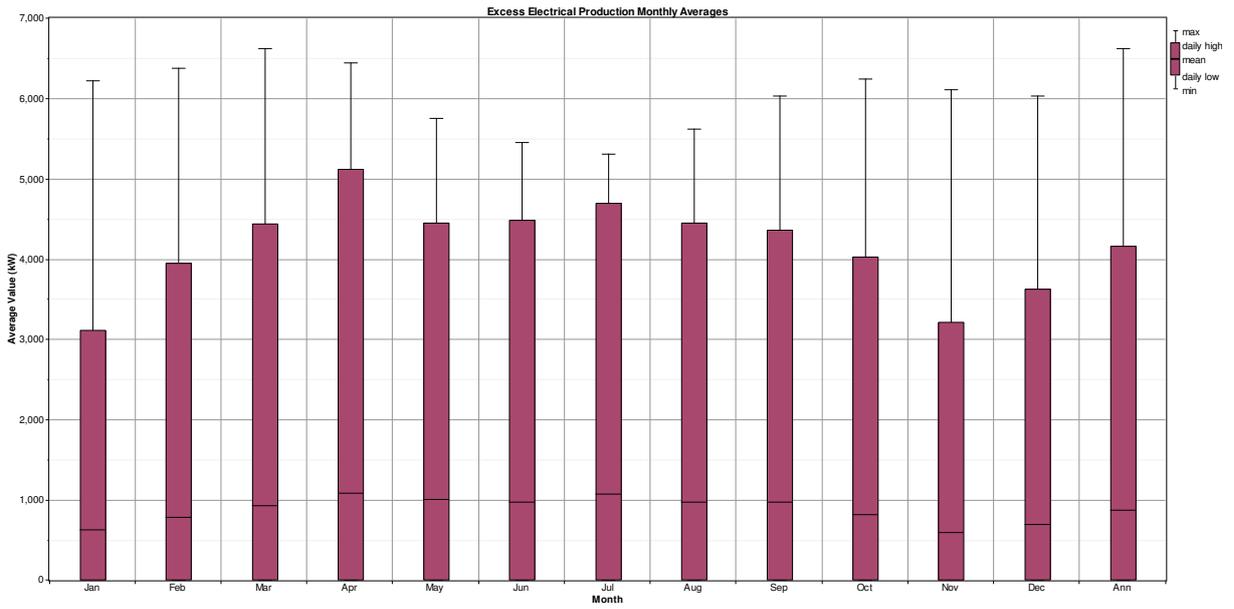
Annexe (B)



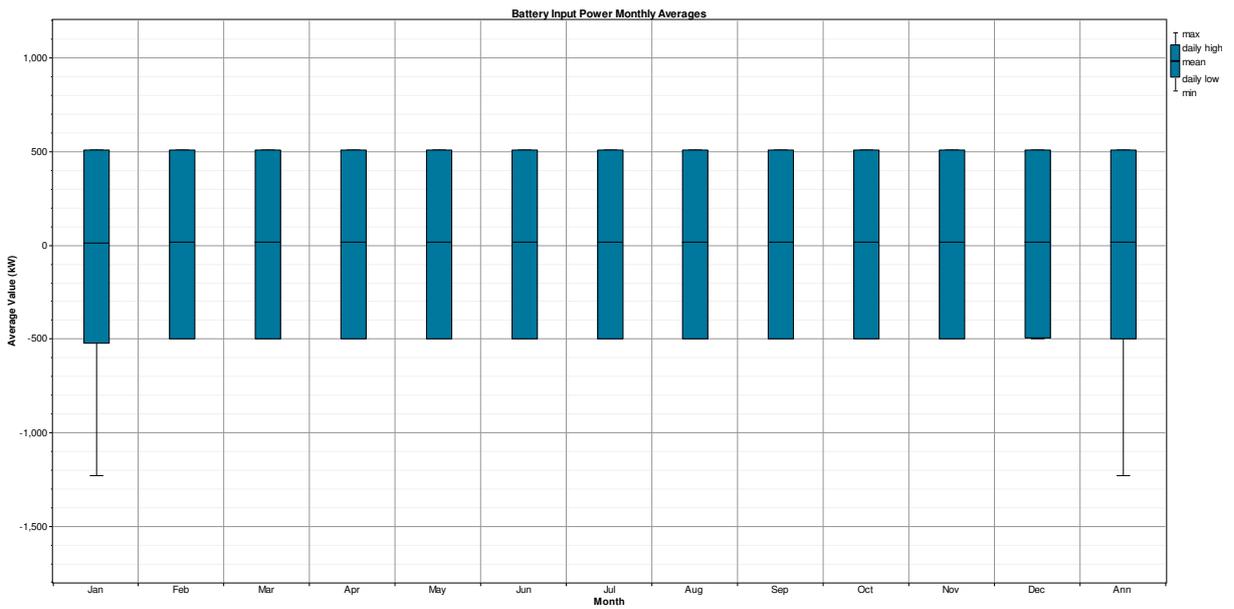
Annexe (C)



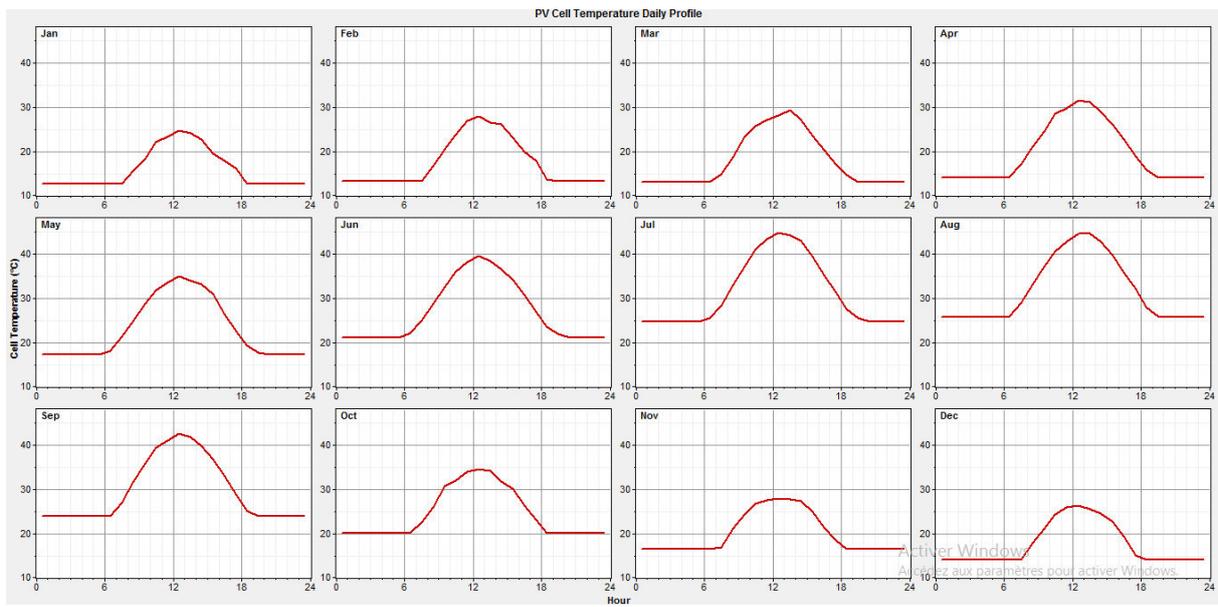
Annexe (D)



Annexe (E)



Annexe (F)



Annexe (G)

