

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologies

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Automatique

Présenté Par : GHEZAL Anouar Nabil

Thème

**Etude et Analyse d'une mini centrale hybride
PV/Groupe électrogène avec stockage**

Soutenu publiquement le : 21 / 05 /2015

Devant le jury :

M. BOUAROUR Kamel	Maître de Assistant A	URAER Ghardaïa	Président
M. ADOUANE Mabrouk	Maître de recherche B	URAER Ghardaïa	Encadreur
M.TOUAFEK Khaled	Maître de recherche A	Univ. Ghardaïa	Examineur
M. ARIF Mohamed	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2014/2015

REMERCIEMENTS

Mes remerciements sont adressés en premier lieu à mes chers parents qui m'ont aidé et soutenu tout au long de mon cursus.

Je tiens à remercier mon promoteur M. Mabrouk ADOUANE pour son assistance et son dévouement.

Je remercie aussi toute l'équipe pédagogique et administrative du centre des Energies renouvelables de Ghardaïa.

Mes vifs remerciements vont aussi à tous les collègues de la promotion, ainsi que tous mes amis.

Résumé

Dans ce mémoire, nous étudions tous les facteurs qui entrent dans le système hybride qui nous permettront d'alimenter une maison dans une zone rurale reculée. Pour ce faire, nous devons étudier la partie économique et technique du système de sorte que la production et le rendement puissent donner le coût le plus bas et le plus efficace, ainsi que la continuité de la production jour et nuit dans des conditions difficiles afin de réduire le risque de pollution causée par l'ancien utilisateur du système dans les zones rurales résultant de l'émission de CO₂ par des générateurs diesel et aussi réduire le coût élevé des prix du gazole. L'hybridation des sources de production d'énergie peut se présenter actuellement comme une alternative énergétique rationnelle par rapport aux sources conventionnelles pour l'électrification des zones rurales et isolées. En effet, la disponibilité locale et le coût nul de la matière première (soleil, vent), sont des avantages qui nous incitent à nous pencher vers les énergies renouvelables vis-à-vis de l'augmentation du prix et la raréfaction des énergies fossiles. Notre travail consiste alors à l'élaboration d'un banc d'essai d'un mini central hybride représentant un système réel d'électrification d'un habitat qui a été réalisé au niveau du site de Ghardaïa. Il comprend des modules photovoltaïques disposés sur une structure inclinable, d'un groupe électrogène fonctionnant au diesel et des batteries de stockage.

Mots-clés: Electrification rurale décentralisée, Groupe électrogène, Système photovoltaïque, Système hybride, PV

ملخص

في هذه الأطروحة تناولنا دراسة لجميع العوامل التي تدخل في النظام الهجين والتي من شأنها أن تسمح لنا بتغذية منزل في منطقة ريفية نائية ومعزولة, وقد قمنا بدراسة للجزء الاقتصادي والفني لهذا النظام, بحيث يكون الإنتاج والمردود المقدم لنا بأقل تكلفة وأكثر فعالية واستمرارية في الإنتاج ليلا ونهار وفي الظروف الصعبة, وللتقليل من مخاطر التلوث التي يتسبب بها النظام القديم المستعمل في الأرياف الناتج عن انبعاث ثاني أكسيد الكربون من طرف مولدات الديزل وكذلك للحد من التكلفة العالية لاسعار الديزل, وهذا التهجين للمصادر الطاقة قد يكون حاليا كبديل للمصادر الطاقة التقليدية للكهرباء في المناطق الريفية والنائية لتوفره المحلي وبدون تكلفة للمواد الخام (الرياح والشمس), وهذه من المزايا التي تشجع لنا بأن ننظر الى الطاقة المتجددة وجها لوجه مع ارتفاع أسعار ونذرة الوقود الاحفوري. وقد تم انجاز منصة اختبار لمحطة هجينة مصغرة لنظام حقيقي لتزويد مسكن بالكهرباء على مستوى غرداية تتكون من ألواح شمسية مركبة على هيكل قابل الميلان مولد كهربائي يعمل بالديزل, وبطاريات لتخزين

الكلمات المفتاحية: الكهرباء الريفية الا مركزية, نظام الكهروضوئية, نظام الهجين,

Nomenclature

λ :	longueur d'onde électromagnétique de la lumière du soleil.
V_{c0} :	la tension de circuit ouvert du module photovoltaïque.
I_{cc} :	courant de court circuit du module photovoltaïque.
SEH:	Systèmes d'Energie Hybrides (SEH).
CFE	concept « Flexy Energy »
U_m	Tension maximale
I_m	Courant maximal
P_m	Puissance maximale
PPV,DC	puissance délivrée.
η_{PV} :	rendement des modules PV.
η_{inv} :	puissance solaire reçue sur toute la surface du champ PV.
PPV,AC	puissance AC délivrée par l'onduleur .
η_{inv} :	rendement de l'onduleur.
PV	Photovoltaïque
EC	Eclairement solaire
WC	Puissance crête
VPV	Tension photovoltaïques
IPV	Courant photovoltaïques
U_m	Tension maximale
I_m	Courant maximal
P_m	Puissance maximale

Nomenclature

CCAP, GE Coût d'investissement du groupe électrogène

CCAP, BT Coût d'investissement des batteries

CCAP, CONV Coût d'investissement des convertisseurs

CCAP, INST Coût d'installation

CCAP, ATR Autre coût

CCAP, CHAR Charges supplémentaires à long terme,

CINST, PV Frais d'installation des modules PV,

CINST, BT Frais d'installation des batteries,

CINST, GE Frais d'installation du groupe électrogène,

CINST, CONV Frais d'installation des convertisseurs,

CINP Coût de l'expédition,

CATR Autres coûts,

CANN,TOT Coût total annuel du système,

CANN,PV Coût annuel de PV,

CANN,BT Coût annuel des batteries,

CANN,GE Coût annuel du groupe électrogène,

CANN,CONV Coût annuel des convertisseurs,

CANN,CRB Coût annuel du carburant,

CANN,STS Coût annuel du système,

CANN,ATR Autres coûts annuel,

Nomenclature

CCRB/L	Coût du litre de carburant,
HrGroupe	Les heures de fonctionnement du groupe électrogène,
CREPL,GE	Coût de remplacement annuel du groupe électrogène,
CGE	Coût de la révision du groupe électrogène
CREPL,BT	Coût de remplacement annuel de la batterie,
CBT	Coût de remplacement de la batterie,
CREPL,CONV	Coût de remplacement annuel des convertisseurs,
CCONV	Coût de remplacement des convertisseurs
CREPL,ATR	Coût de remplacement annuel autre,
PWF	Facteur de la valeur actualisée,
F	La future valeur, devise
n	La durée de vie des composants, année,
i	Taux d'intérêt actuel
if	Taux d'intérêt
f	Taux d'inflation
CANN,PW	Valeur actuelle annuel
CANN,TOT	La valeur annuelle totale,
CREC,PW	La valeur actuelle récupérée
CREC	La valeur récupérée.

Table des matières

	Introduction générale	1
Chapitre I	Généralités sur Les énergies renouvelables En Algérie	
I.1	Introduction.....	4
I.2	Les différentes sources d'énergie.....	5
I.2.1	Energies fossiles.....	5
I.2.2	Energies renouvelables.....	6
I.2.2.1	les différents types d'énergie renouvelables.....	7
A)	Energie solaire.....	8
1	Rayonnement solaire.....	8
2	Différents types de rayonnement solaire.....	10
3	Les caractéristiques du rayonnement solaire.....	12
4	technique pour capter l'énergie solaire.....	12
B)	L'énergie géothermique.....	15
1)	Utilisation de l'énergie géothermique en Algérie.....	16
C)	L'énergie éolienne.....	18
I.2.2.2.4	L'énergie de biomasse.....	20
I.3	Conclusion:	21
Chapitre II	Énergie solaire et description du système photovoltaïque	
II.1	Introduction.....	23
II.1	Définition.....	23
II .2	Description de l'élément d'un système de captage photovoltaïque.....	25
II .2.1	la cellule photovoltaïque.....	35
II .2.2	Le panneau solaire photovoltaïque.....	27
a)	Caractéristiques d'un le panneau solaire.....	28
II .2.3	le panneau solaire photovoltaïque.....	28
II .3	L'effet photovoltaïque.....	29
II .4	potentiel du photovoltaïque en Algérie	30
II .5	Les performances d'un système PV.....	30
II .6	les types d'une installation de système PV.....	31
II.6.1	Systèmes autonomes.....	31
II.6.1.1	Description des éléments d'un système photovoltaïque.....	31
A)	système de stockage.....	32
1)	Définition d'une batterie solaire.....	33
2)	Caractéristiques d'une batterie.....	33
3)	Type de batterie utilisée.....	35
D	Types d'accumulateurs.....	36
B)	Système de régulation.....	37
1)	Régulation de charge série.....	38
2)	Régulateur de charge de coupure.....	38
3)	Régulateur de charge à découpage.....	38
4)	Régulateur de charge série à coupure partielle.....	39
5)	Régulateur de charge parallèle.....	39
C)	Système de conversion.....	40
1)	Le convertisseur continu -continu.....	40
2)	convertisseur continu- alternatif.....	41
D)	charge.....	43

II.6.2	Systèmes hybrides.....	43
II.6.3	Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	43
II.7	Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	53
II.8	Conclusion.....	45
Chapitre III	Composantes des systèmes hybrides PV/ Groupe électrogène	
III.	Introduction.....	47
III.2	Générateur Diesel.....	49
III.2.1	Les performances des groupes électrogènes.....	50
III.2.2	Avantages et inconvénients des groupes électrogènes.....	51
III.3	Systèmes hybrides de production d'électricité.....	52
III.4	Structure du système hybride	53
III.5	Les différentes configurations des technologies hybrides PV/Diesel de production d'électricité.....	54
III.5.1	La configuration série ou single master fixe.....	54
III.5.1.1	Fonctionnement du système.....	55
III.5.1.2	Les avantages de cette configuration est.....	56
III.5.1.3	Les inconvénients de cette configuration sont.....	56
III.5.2	La configuration PV/diesel commutée ou single master changeant.....	57
III.5.2.1	Fonctionnement du système.....	57
III.5.2.2	Les avantages de cette configuration sont.....	58
III.5.2.3	Ses inconvénients sont	58
III.5.3	Configuration parallèle ou multi master.....	58
III.5.3.1	Fonctionnement du système.....	59
III.5.3.2	Les avantages de ce système	60
III.5.3.3	Les inconvénients de ce système	60
III.6	LE CONCEPT « FLEXY ENERGY » (CFE).....	61
III.6.1	Description du CFE.....	61
III.6.2	Les objectifs visés par le CFE.....	69
III.6.3	La pertinence technologique du CFE.....	63
III.7	CONCLUSION.....	64
Chapitre IV	Conception et économie des systèmes hybrides	
IV.1	Introduction.....	66
IV.2	Dimensionnement et méthodes d'optimisation.....	66
IV.2.1	Etude technique des systèmes PV hybrides.....	74
A)	Présentation de Logiciels PVSYST.....	67
IV.4	Profil de charge d'une maison.....	68
1)	Générateur PV.....	68
2)	Batterie.....	69
3)	régulateur.....	69
4)	générateur (groupe électrogène)	69
IV.5	Etude économique des systèmes PV hybrides.....	72
IV.5.1	Coût total d'investissement.....	73
IV.5.2	Coût annuel.....	74
IV.5.3	Le coût de remplacement.....	74
IV.5.4	Valeur actuelle des coûts annualisés et la valeur récupérer.....	75
IV.5.5	Coûts du cycle de vie (CCV)	75
IV.5.6	Valeurs actuelles nettes (VAN)	75
IV.5.7	Coûts moyens actualisés de l'énergie (COE).....	75
IV.5.8	Présentation de l'outil de simulation adopté.....	76

IV.6	Evaluation des données climatiques.....	76
IV.6.1	Les zones climatiques de l'Algérie.....	76
IV.6.2	Présentation du site d'étude.....	78
IV.7	Simulation du système hybride adopté	82
IV.7.1	Le Générateur Photovoltaïque.....	85
IV.7.2	Les Batteries (BERGAN ENERGY)	86
IV.7.3	Le Générateur Diesel.....	87
IV.7.4	onduleur.....	90
IV.8	Résultats de simulation obtenus pour un système hybride.....	92
IV.8.1	Répartition des coûts d l'installation.....	93
IV.8.2	Analyse environnementale.....	94
IV.9	conclusion.....	95

Liste des figures

Figure I.1	Les différentes sources d'énergie, fossiles.....	5
Figure I.2	Répartition des ressources dans la production d'énergie primaire.....	7
Figure I.3	Les différentes sources d'énergie renouvelable.....	7
Figure I.4	Carte d'ensoleillement global en KWh/ m ² /jour dans L'Afrique....	8
Figure I.5	Rayonnement solaire.....	9
Figure I.6	Spectre solaire hors atmosphère.....	10
Figure I.7	Composantes du rayonnement solaire.....	11
Figure I.8	Appareils de mesure de différents rayonnements solaires.....	11
Figure I.9	Conception solaire passive.....	13
Figure I.10	Schéma d'un system photovoltaïque.....	13
Figure I.11	Schéma d'installation d'un chauffe-eau-sanitaire-Individuel.....	14
Figure I.12	Les deux type d'énergie solaire.....	15
Figure I.13	Le ventilo-convecteur dans la salle de cantine.....	18
Figure I.14	Schéma d'un dispositif éolien à axe verticale et horizontale.....	19
Figure II.1	Schéma simplifié du principe du photovoltaïque.....	24
Figure II.2	Schéma du système photovoltaïque.....	24
figure II. 3	Cellule photovoltaïque, Panneau photovoltaïque, Champ Photovoltaïque.....	25
Figure II.4	Présentation schématique d'une cellule solaire, jonction PN.....	26
Figure II.5	Le panneau solaire photovoltaïque.....	26
Figure II.6	Boîte de jonction.....	27
Figure II.7	Installation solaire.....	28
Figure II.8	Schéma d'un system photovoltaïque autonome.....	32
Figure II.9	Batterie au plomb acide.....	35
Figure II.10	Schéma de principe d'un régulateur de charge série.....	38

Figure II.11	Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage.....	39
Figure II.12	Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle.....	40
Figure II.13	Schéma de l'onduleur triphasé.....	42
Figure III.1	Configuration du moteur diesel.....	49
Figure III.2	Consommation d'un groupe de 30 kW (13).....	50
Figure III.3	Coût d'exploitation en fonction du taux de charge du groupe	51
Figure III.4	Classification des systèmes d'énergie hybrides.....	52
Figure III.5	Configuration PV/diesel série.....	55
Figure III.6	Configuration commutée.....	57
Figure III.7	Configuration PV/Diesel parallèle.....	59
Figure III.8	Différentes architectures de la configuration PV/Diesel parallèle(a)	
	Architecture « Multi-master» avec générateurs Diesel, (b)	
	architecture « multi-master » avec onduleurs.....	61
Figure III.9	Architecture général des centrales « Flexy Energy ».....	62
Figure IV.1	Le plan du capteur d'orientation.....	68
Figure IV.2	Résumé du système proposé par notre PVSYST.....	70
Figure IV.3:	résultat de La simulation d'indice de performance de l'énergie solaire et la rupture	70
Figure IV.4	Le Schéma de perte sur toute l'année	72
Figure IV.5	Les zones climatiques de l 'Algérie.....	77
Figure IV.6	Emplacement géographique du site d'étude.....	78
Figure IV.7	Rayonnement solaire mensuel moyen pour le site de Ghardaïa.....	79
Figure IV.8	Configuration du Système Hybride étudié.....	80
Figure IV.9	Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source.....	81
Figure IV.10	Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source.....	83
Figure IV.11	Représentation des puissances moyennes mensuelles du PV....	83
Figure IV.12	Etat de charge moyenne journalière des batteries.....	85
Figure IV.13	Etat de charge mensuelle des batteries (en%).....	86
Figure IV.14	Puissances journalières moyennes délivrées par le diesel.....	88

Figure IV.15	Production journalière moyenne du Diesel pour toute l'année.	89
Figure IV.16	Représentation des puissances moyennes mensuelles du diesel.	90
Figure IV.17	Distribution de la puissance moyenne journalière délivrée par L'onduleur.....	91
Figure IV.18	Variantes proposées par HOMER.....	92
Figure IV.19	Répartition des coûts de l'installation.....	94

Liste des tableaux

Tableau II.1	Type de batterie existant actuellement sur le marché...	36
Tableau II.2	Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	44
Tableau III.1	Avantages et inconvénients d'un groupe électrogène...	51
Tableau IV.1	profil de charge d'une maison.....	68
Tableau IV.2	énergie consommée estimation mensuelle.....	71
Tableau IV.3	L'énergie produite annuellement.....	81
Tableau IV.4	consommée d'énergie annuelle.....	81
Tableau IV.5	Paramètres des composants du Générateur	82
Tableau IV.6	Paramètres des composants du la batteries.....	84
Tableau- IV.7	Paramètres de fonctionnement du générateur diesel....	87
Tableau IV.8	Paramètres des composants d'un groupe électrogène...	87
Tableau IV.9	Paramètres des composants de l'onduleur.....	90
Tableau IV.10	Coûts de l'installation.....	93
Tableau IV.11	Emission des polluants atmosphériques.....	95

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

De nos jours la couverture du réseau électrique conventionnel ne cesse de s'étendre, mais il reste désespérément des zones inaccessibles par leur éloignement, comme les régions rurales ou désertiques, qui font augmenter la facture du raccordement. Les solutions autonomes et décentralisées offrent donc une alternative pertinente pour permettre aux populations de ces zones d'accéder à l'électricité. Aujourd'hui, le générateur diesel est la technique la plus utilisée pour l'électrification décentralisée. Néanmoins, les coûts d'approvisionnement en carburant sont très élevés et augmentent progressivement avec l'éloignement. L'Algérie ayant lancé dernièrement un important programme en énergies renouvelables, nous avons donc à trouver une manière de remplacer les groupes électrogènes qui sont très utilisés dans nos régions désertiques. Les sources d'énergie d'origine renouvelables (solaire, éolien,..) offrent donc une alternative réaliste pour l'électrification de ces régions éloignées. Au cours de cette dernière décennie, le recours aux énergies renouvelables a contribué d'une manière efficace à résoudre les problèmes dus à l'approvisionnement en énergie, non seulement au regard de critères écologiques, mais aussi en raison de leur structure décentralisée. Une des caractéristiques qui limite l'utilisation des énergies renouvelables est liée à la variabilité de leurs ressources. Les fluctuations de la charge selon les périodes journalières ou annuelles ne sont pas forcément proportionnelles avec les ressources. Ainsi, l'association de plusieurs sources (mode hybride) s'avère nécessaire pour couvrir les besoins en énergie électrique durant toute l'année. Afin d'assurer l'équilibre production consommation, des systèmes de stockage d'énergie sont indispensables. De plus, des sources d'énergie complémentaires telles que les groupes électrogènes sont sollicités en cas de manque d'énergies renouvelables. En site isolé, les systèmes de production hybrides doivent réaliser deux objectifs: premièrement, assurer l'autonomie énergétique du site, par la maîtrise de la production et la consommation d'énergie; et deuxièmement, la rentabilité économique et écologique, en récupérant certes le plus possible d'énergie à un moment donné, mais aussi en maximisant la durée de vie et la fiabilité des composants du système hybride. Nous choisissons donc de nous concentrer sur la gestion et la surveillance des systèmes hybrides de production d'électricité en site isolé, qui valident ces deux objectifs avec de meilleures performances que les solutions usuelles. La région de Ghardaïa située au centre de la partie nord du Sahara

algérien, à 600 km au sud d'Alger, offre un potentiel énergétique solaire très important. La majorité des sites situés dans cette région pourraient être considérés comme sites isolés vue leur superficie immense et leur éloignement par rapport à tout réseau électrique. Par ailleurs, cette partie désertique est de plus en plus peuplée. Tenant compte de ces paramètres, la région de Ghardaïa a été choisie pour l'étude.

Ce mémoire est réparti en quatre chapitres:

- Dans le premier chapitre, nous donnons quelques généralités sur les énergies nouvelles et renouvelables et ces applications en Algérie.
- Dans le deuxième chapitre, nous faisons une description générale de chaque élément constituant la station photovoltaïque.
- Nous exposons dans le troisième, les différents composants d'un système hybride et leurs fonctionnements. Cette étude nous a permis de bien comprendre la physique de tels systèmes et de mieux analyser leurs faiblesses pour pouvoir les corriger.
- Dans le quatrième chapitre, la conception et l'évaluation économique d'un système photovoltaïque hybride est effectué. Le projet vise à étudier et optimiser les systèmes hybrides photovoltaïque/groupe électrogène avec stockage en intégrant des concepts innovants pour la construction et la mise en œuvre d'un tel système dans un milieu saharien.

**GÉNÉRALITÉS
SUR LES ÉNERGIES
RENOUVELABLES EN ALGÉRIE**

I.1 Introduction

Une grande partie de la production mondiale d'énergie électrique est assurée à partir des sources fossiles comme le charbon, le pétrole, le gaz, concurrents à partir du XVIII^e siècle. Ces sources d'énergie beaucoup plus concentrées et plus efficaces, ne sont pas équitablement réparties dans le monde. D'où la recherche des ressources d'énergie alternatives est devenue donc une question cruciale de nos jours. Beaucoup de recherches scientifiques ont été menées dans le secteur des sources d'énergies illimitées, telles que la production d'électricité à partir des énergies renouvelables.

L'Algérie a longtemps été un pays producteur de gaz et de pétrole; les réserves de ces énergies fossile sont limitées dans le temps, et polluants pour l'environnement. Afin de maintenir l'économie de l'Algérie il faut penser à développement d'autres énergies.

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois [1]

L'Algérie, un pays très vaste d'un climat très diversifié, ayant deux grandes zones géographiques distinctes, les Nord méditerranéen et le sud saharien, peut devenir un bon concurrent dans cette course de recours aux énergies renouvelables. Les zones du nord de l'Algérie sont à ciel - couvert plus que ceux du sud. Les régions Sahariens reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En raison de cette diversité dans le climat, l'ensoleillement moyen global au plan horizontal reçu varie entre 4,5 et 7.5 kWh/m². En tenant compte de cette diversité. [1]

Dans ce chapitre nous donnons quelques généralités sur les énergies renouvelables et non renouvelables et leurs applications en Algérie.

I.2 Les différentes sources d'énergie

Il existe différentes source d'énergie que l'on peut séparer en deux grandes familles :

La matière première et les phénomènes naturels. Les premières fournissent les énergies dites fossiles alors que les autres fournissent les énergies dites renouvelables

I.2.1 Energies fossiles

Les énergies fossiles (figure I.1) proviennent de la combustion de matières premières comme les trois grandes familles: Pétroles, Charbon ,Gaz naturel.



Figurer I.1: Les différentes sources d'énergie, fossiles

Ces combustibles se sont élaborés durant des centaines de millions d'années. C'est pourquoi on les appelle les combustibles fossiles et l'énergie fossile. Les réserves en matières premières sont abondantes mais malheureusement non renouvelables[2].

Les énergies fossiles ont divers avantages et inconvénient variant selon leur naturelle.

❖ Charbon

À l'avantage d'être assez bien réparti au niveau de la planète et aussi disponible en très grand quantité. Ces principaux inconvénients d'être très couteux au niveau de son exploitation et très polluante sur le plan écologique.

❖ Pétrole

A L'instar du charbon, parmi ses principaux avantages d'être disponible sur presque tous les points du globe, son rendement énergétique est très important, il permet de produit un nombre incalculable de produit dérivés (plastique, engrais, gaz méthane, et propane, essence etc...) dont l'humanité aurait du mal à se passer.

Parmi ces inconvénients on peut citer le fait qu'il soit très polluant aussi bien à la production qu'à l'utilisation et son prix soit voué à atteindre des sommets de plus en plus vertigineux, et qu'il soit à source de nombreux conflits à travers le monde.

❖ Gaz naturel

A quant à lui comme avantage principaux d'être très facilement exploitable, disponible en grand quantité à travers le monde, ne nécessiter aucune transformation pour être utilisé, et peu polluant par rapport aux autres [3].

I.2.2 Énergies renouvelables

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre l'apport direct sous forme de lumière et chaleur, elle est à l'origine de la biomasse (photosynthèse), du cycle de l'eau, des vents, des courants océaniques et, sous forme stockée, de nos réserves de gaz, pétrole et charbon. Les seules ressources énergétiques non solaires sont la chaleur de la terre (géothermie, moins de 1W/m²), les marées et l'énergie nucléaire (fission et peut-être fusion).

Nos réserves d'uranium sont très faibles (quelques dizaines d'années). Les énergies fossiles ne sont pas inépuisables, mais surtout leur utilisation mène à une libération de CO₂ qui modifie l'équilibre global du bilan thermique de la planète par l'effet de serre. Si bien qu'à long terme, la seule solution viable pour l'homme, en attendant les réacteurs à fusion nucléaire (encore hydraulique, vent, biomasse, marées et énergie thermique de mers.) [4]

Bien que les énergies renouvelables soient reconnues comme étant des énergies propres, favorables à la préservation de l'environnement, leur part dans la fourniture mondiale d'énergies primaires est très marginale, comme le montre la figure I.2.

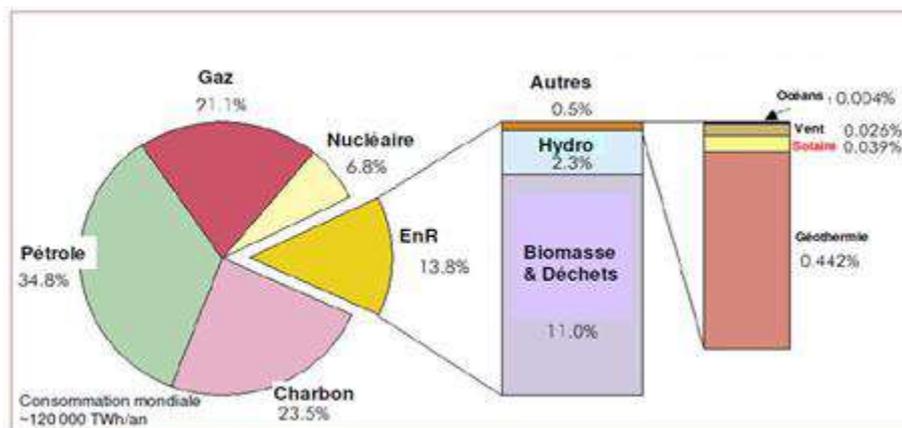


Figure I.2: Répartition des ressources dans la production d'énergie primaire.

Le soleil est la source d'énergie renouvelable par excellence et est une énergie propre, silencieuse et inépuisable; il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois.



Figure I.3: Les différentes sources d'énergie renouvelable.

Notre consommation globale d'énergie, C'est pourquoi l'homme cherche depuis des millénaires à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur thèse généralités sur les énergies nouvelle et renouvelables en Algérie l'ensemble de la planète [5]

I.2.2.1 Les différents types d'énergie renouvelables

Les sources d'énergie renouvelables sont fréquentes et variées. Parmi les plus connues, largement et les plus utilisés se trouvent :

- Énergie solaire
- Énergie éolienne
- Énergie hydraulique

- Energie géothermique
 - Biomasse
- [6]

A) Energie solaire

L'Afrique fait partie des régions les plus ensoleillées au monde. presque tout le Maghreb, les pays sahéliens et l'Afrique australe sont dans la ceinture solaire (régions du monde où l'ensoleillement normal direct excède 2000kWh/m²/an).le Burkina Faso dont l'irradiation globale moyenne est environ 5,5kWh/ m²/jour, bénéficie d'un ensoleillement favorable à l'implantation de projets de production d'énergie solaire(figure3).En outre, ce pays est signataire du protocole de Kyoto adopté en 1997,qui vise une réduction des gaz à effet de serre à travers le développement énergies renouvelables et la prise en compte de l'efficacité énergétique dans les projets de développement , nous donnons la carte d'ensoleillement global dans L'Afrique et Maghreb dans la figure I.4.

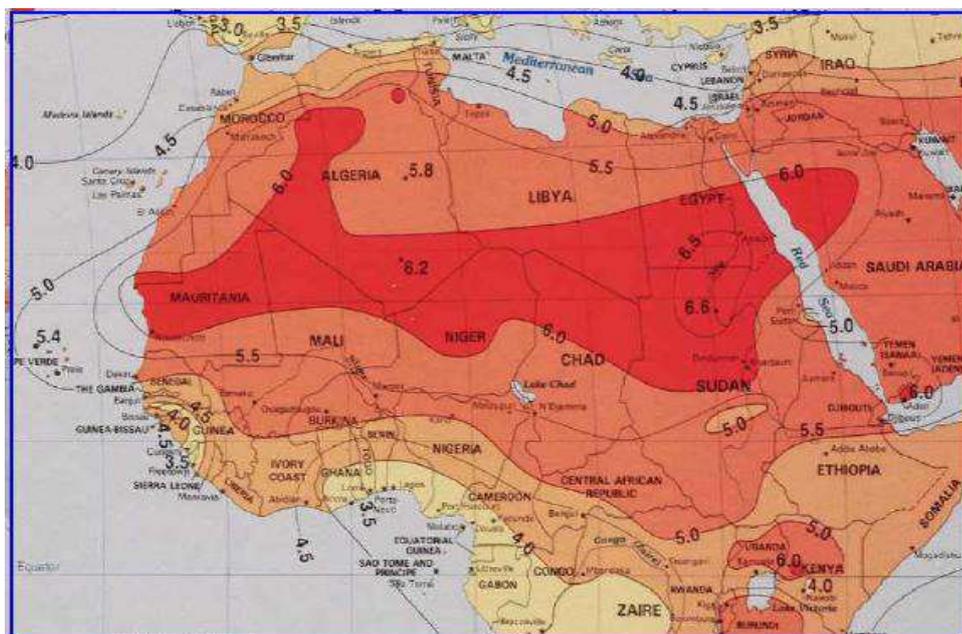


Figure I.4: carte d'ensoleillement global en KWh/ m²/jour dans L'Afrique et Maghreb [4]

1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est lumière qui provient du soleil sous forme d'onde électromagnétique dont 89% d'énergie est compris entre $\lambda = 0,25\mu\text{m}$ et $\lambda = 4\mu\text{m}$, le reste représente 1% au-dessus et 1% au-dessous de cet intervalle.

La répartition d'énergie en fonction de la longueur d'onde est :

- ❖ Pour $0,25 \mu\text{m} < \lambda < 0,4\mu\text{m}$: c'est le domaine de l'ultraviolet (invisible), il représente 7 % de l'énergie totale émise par le soleil.
- ❖ Pour $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,8\mu\text{m}$: c'est le domaine du visible, il représente 47,5 % de l'énergie totale émise par le soleil.
- ❖ Pour $0,8 \mu\text{m} < \lambda < 4 \mu\text{m}$: c'est le domaine de l'infrarouge (invisible), il représente 45,5 % de l'énergie totale émise par le soleil, le rayonnement solaire est représenté par la lumière (LV : $0,4 \mu\text{m} \rightarrow 0,8 \mu\text{m}$) et de la lumière invisible [(UV : $0,25 \mu\text{m} \rightarrow 0,4 \mu\text{m}$) et (IR : $0,8 \mu\text{m} \rightarrow 4 \mu\text{m}$)]

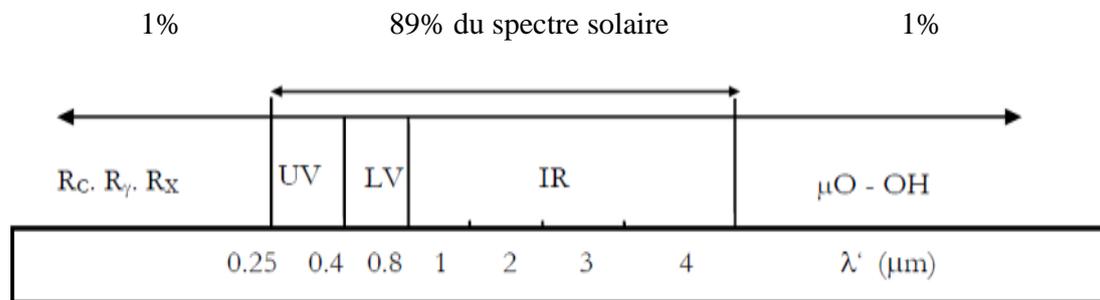


Figure I.5: Le rayonnement solaire

L'analyse du spectre du rayonnement solaire montre une ressemblance avec celui d'un corps noir de même surface et porté à une température de 5777k dans l'intervalle du spectre $[0,25 \mu\text{m} \rightarrow 4 \mu\text{m}]$. [7]

La représentation de Spectre solaire hors atmosphère, est montrée dans figure I.6.

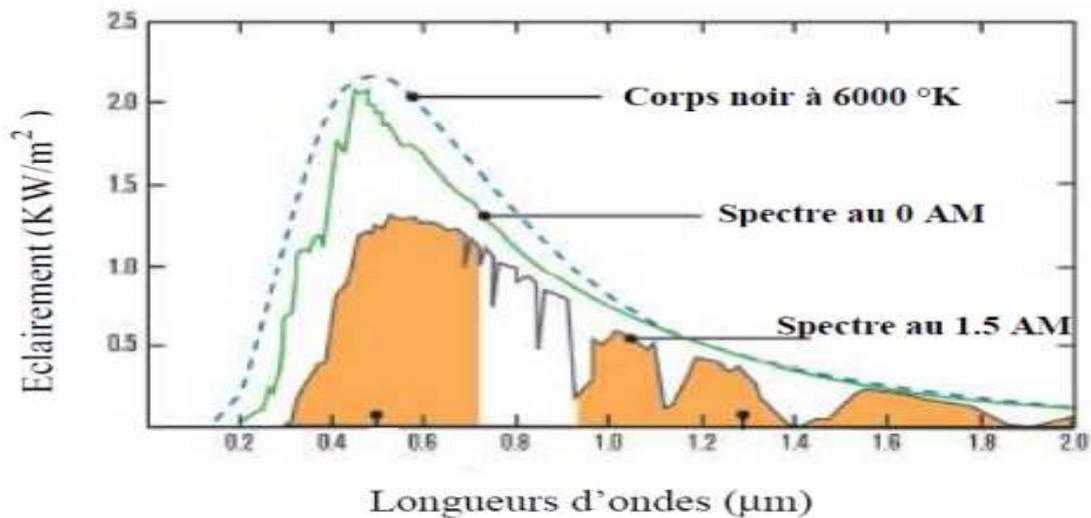


Figure I.6 : Spectre solaire hors atmosphère [8].

Le rayonnement solaire au niveau du sol est formé principalement du rayonnement direct et diffus. Le rayonnement direct parvenant directement de l'angle solide délimité par le disque solaire. Tandis que le rayonnement solaire diffus parvient de toute la voûte céleste et n'a pas d'orientation privilégiée. L'ensemble forme le rayonnement global. [8].

2 Différents composants de rayonnement solaire

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, On distingue quatre types de rayonnement solaire (figure 1.4)

➤ Le rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre [9].

➤ Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Donc ayant subi multiples réflexions. Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste.

Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil. La figure I.7 montre une Composantes du rayonnement solaire

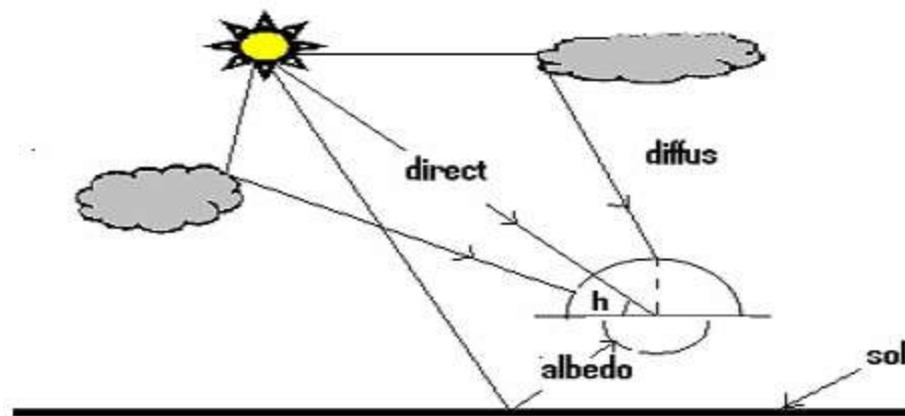


Figure I.7: Composants du rayonnement solaire.

➤ Le rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo (ξ), $0 \leq \xi \leq 1$. Il dépend de l'environnement du site, cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige)

➤ Le rayonnement global

Le rayonnement global est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi. La figure 1.8 présente les appareils de mesure pour les différents types de rayonnement.



Pyrhéliomètre pour l'irradiation directe



Pyranomètre pour l'irradiation globale



Pyranomètre pour l'irradiation diffuse



Pyranomètre pour l'irradiation réfléchi

Figure I.8: Appareils de mesure de différents rayonnements solaires.

3 Les caractéristiques du rayonnement solaire

Le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend de plusieurs paramètres

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre ;
- la latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude ;
- la période de l'année ;
- l'instant considéré dans la journée. [1].

4 Technique pour capter l'énergie solaire

Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie sont disponibles et sont constamment améliorées. On peut distinguer le solaire passif, le solaire photovoltaïque et solaire thermique.

❖ L'énergie solaire passive

L'énergie solaire passive est une énergie abondante et non polluante qui suppose la conception des bâtiments et la mise en place des composants de construction appropriés afin d'utiliser l'énergie solaire pour l'éclairage naturel, le chauffage des locaux et/ou la climatisation des locaux. En plus de réduire la consommation d'énergie, un avantage primordial que procure l'énergie solaire passive est le confort ressenti par les occupants.

Le chauffage solaire passif fonctionne comme suit ; l'énergie lumineuse du Soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres est absorbée par les murs, les planchers et les meubles, puis libérée sous forme de chaleur. Des baies vitrées ainsi que la thermo circulation permettent de faire diminuer la consommation en d'autres énergies. Il permet de chauffer de l'eau par circulation de liquide caloporteur dans des tubes chauffant le ballon d'eau (il y a deux types de circulations : la forcée avec une pompe ou la spontanée grâce à la remontée naturelle du liquide chauffé) [10]. la Figure I.9

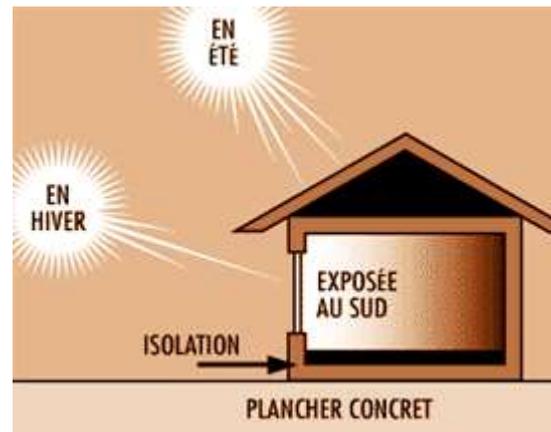


Figure I.9: conception solaire passive [11].

❖ L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie.

Elle est radicalement différente de l'énergie solaire thermique qui, quant à elle, produit de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer de l'eau ou de l'air. On utilise dans ce cas capteurs thermiques qui relèvent d'une toute autre technologie. Dans le langage courant, ce sont des « chauffe-eau solaires » ou des « capteurs à air chaud ».

Il y a aussi ce qu'on appelle l'énergie solaire thermodynamique, qui fonctionne sur un principe de concentration des rayons solaires au moyen de miroirs galbés, en un foyer placé sur une tour qui emmagasine les calories pour les restituer ensuite sous forme mécanique à l'aide d'une turbine à vapeur par exemple.

Ces aspects de l'énergie solaire ne sont pas traités dans cet ouvrage, qui est strictement dédié à l'énergie photovoltaïque. On évitera donc le terme « capteur solaire », car il maintient l'ambiguïté entre les différentes techniques.[12]

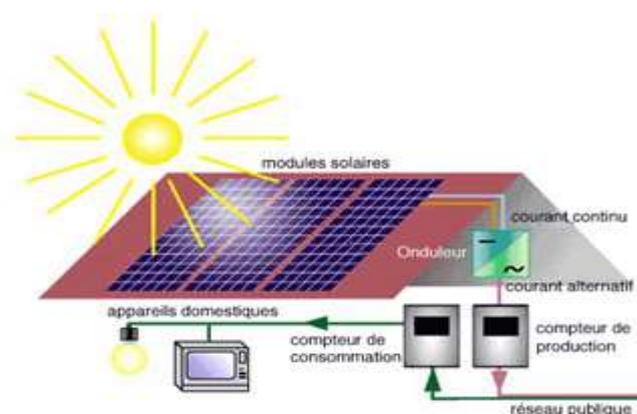


Figure I.10: Schéma d'un système photovoltaïque

❖ L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire. Elle peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). En utilisant la chaleur transmise par rayonnement plutôt que le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes d'énergie solaire comme les cellules photovoltaïques.

Deux principes fondamentaux sont appliqués et éventuellement parfois combinés :

- Capter l'énergie du rayonnement solaire grâce à un corps noir ;
- Concentrer le rayonnement solaire en un point [11] .

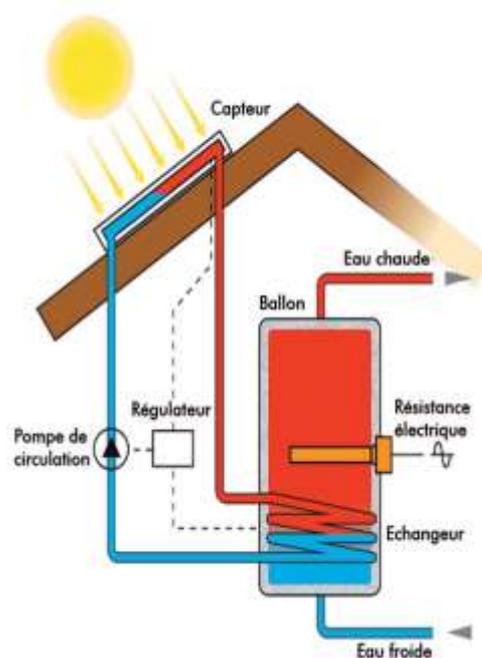


Figure I.11: schéma d'installation d'un chauffe-eau-sanitaire-Individuel auto-vidangeable

La figure I.12 suivante montre les deux types d'énergie solaire:

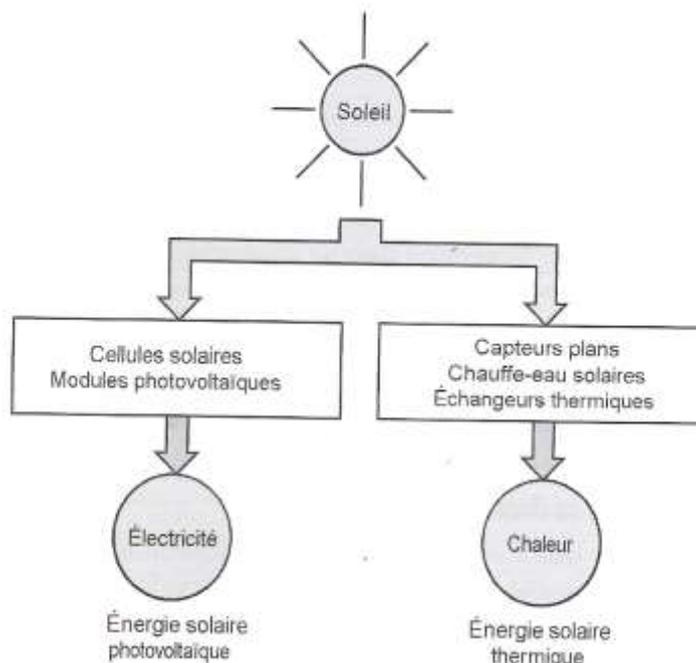


Figure I.12: les deux types d'énergie solaire [13].

B) L'énergie géothermique

Le principe de la géothermie consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou d'électricité.

Partout, la température croît depuis la surface vers l'intérieur de la terre. Selon les régions l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m.

Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de la biomasse. C'est donc une énergie fiable et stable dans le temps [14].

On distingue quatre types de géothermie ; la haute, la moyenne, la basse et la très basse énergie.

➤ **La géothermie très basse énergie**

Géothermie des faibles profondeurs, des nappes phréatiques aux niveaux de température compris entre 10 et 30°C Principales utilisations : pisciculture, horticulture, chauffage.

➤ **La géothermie basse énergie**

La géothermie basse énergie (températures comprises entre 30 °C et 100 °C) géothermie des aquifères profonds (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100°C. Principale utilisation : le chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les process industriels, thermalisme....etc.

➤ **La géothermie haute énergie**

La géothermie de haute énergie (température supérieure à 180°C) est réservée à la production d'électricité [14].

1) **Utilisation de l'énergie géothermique en Algérie**

Les stations thermales médicalisées

Parmi les nombreuses stations thermales qui existent en Algérie, huit seulement sont médicalisées, il s'agit des stations thermales : Hammam zelfana (Ghardaïa), Hammam Bouhanifia (Mascara), Hammam Bouhadjar (Ain Temouchent), Hammam Boughrara (Tlemcen), Hammam Righa (Ain Defla), Hammam Guergour (Setif), Hammam Salhine (Biskra),

Hammam Meskoutine (Guelma). Ces stations thermales sont gérées par la Société Algérienne de Thermalisme et sont conventionnées avec les différentes caisses de sécurité sociale (CNAS, Casnos, caisse militaire) [15].

❖ **Climatisation:**

En Algérie la climatisation est très énergivore en matière de consommation énergétique. Une solution se trouve dans l'exploitation des ressources naturelles non conventionnelles telles que la géothermie.

Dans le cadre d'un programme de promotion des énergies propres et renouvelables de la direction de l'environnement de la wilaya de Saïda, un système de climatisation géothermique a été mis en place à l'école primaire Si Ben Salah, située à Sidi Aïssa commune de Sidi Amar Daïra de Sidi Boubeker.

L'intervention du Centre de Développement des Energies Renouvelables consiste en l'étude de l'efficacité énergétique de cette installation qui est destinée à la climatisation de la cantine de l'école.

Cette installation, qui est alimentée à partir d'une source géothermale dont la température est de 46°C avec un débit de 25 m³/h, est composée de trois systèmes:

- Un système de récupération de la chaleur géothermique.
- Un système de ventilo-convecteur constitué de deux circuits d'eau et d'un circuit d'air pour le chauffage de la cantine en saison hivernale et la climatisation. Le circuit d'air est constitué d'une gaine d'aspiration et de deux gaines de refoulement
- Une pompe à chaleur air-eau qui assure la climatisation durant toute. Son fonctionnement est autonome et peut servir d'appui au chauffage en cas de panne du système de récupération de la chaleur géothermique ou si la température du puits est insuffisante [16].

❖ Agriculture :

Les deux applications principales de la géothermie dans le domaine agricole sont la pisciculture et les serres. Les cultures sous serres constituent une option intéressante, car les besoins en énergie sont élevés. C'est en Algérie que l'on trouve les plus grands complexes de serres chauffées par la géothermie. En ce qui concerne la pisciculture, une augmentation de la température de quelques degrés et surtout son maintien à un niveau constant produit un accroissement du métabolisme chez les poissons et les crustacés. Dans le domaine de la fabrication de produits alimentaires, des températures entre 40° C et 100° C sont utilisées pour déshydrater fruits et légumes. A partir de 60° C, de l'air réchauffé peut servir au séchage de produits agricoles, de poissons et de bois [14].

❖ L'industrie :

La mise hors gel de grands bâtiments industriels peut être assurée par une ressource géothermique de température modérée, mais la plupart des besoins en eau chaude ou en vapeur de l'industrie se situent entre 100° C et 200° C. Si la ressource géothermique est

inférieure à 100° C, elle sera utilisée pour préchauffer l'eau, dont la température sera ensuite relevée au moyen d'une chaudière à gaz ou à fuel. De nombreux processus nécessitent de grandes quantités d'eau chaude, tels que la fabrication de pâte à papier, le lavage de textiles, l'extraction de substances chimiques ou encore l'évaporation de solutions concentrées [14].

C) L'énergie éolienne

L'énergie éolienne (l'énergie de vent) est une forme indirecte de l'énergie solaire. L'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent les masses d'air en mouvement, et créent le vent.

L'Algérie est un très vaste pays caractérisé par une bande côtière peuplée, limité par la méditerranée au nord et l'atlas saharien au sud. Le grand sud, qui représente plus de 90% du territoire, est caractérisé par un climat aride et des populations éparses.

Vu le coût élevé du transport de l'énergie vers les régions isolées, les installations éoliennes autonomes sont mieux adaptées et plus viables pour couvrir les besoins énergétiques des régions du sud de l'Algérie. Toute fois, Cette ultime étape qu'est l'application éolienne, ne peut se faire sans l'étude préalable de la source d'énergie qui est le vent.

La carte de la vitesse annuelle moyenne du vent de l'Algérie, présentée en figure (I.13) , a permis une première identification des sites ventés.

Le gisement éolien est plus important au Sud qu'au Nord, plus particulièrement, dans la région du Sud-ouest limité par Timimoun, In Salah et Tamanrasset où la vitesse dépasse 6m/s à la hauteur de 30 m au dessus du sol [17].

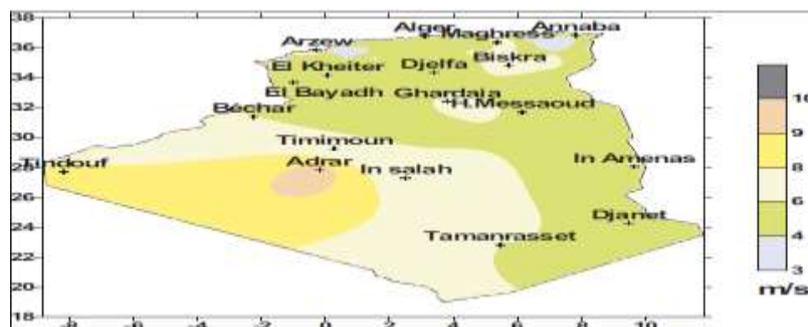


Figure (I.13) : Carte de la vitesse annuelle moyenne de vent dans l'Algérie à 30 m du sol.

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

- **Eolienne à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal.

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

- **Eolienne à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [18]. La figure I.14: Schéma d'un dispositif éolien à axe verticale et horizontale.

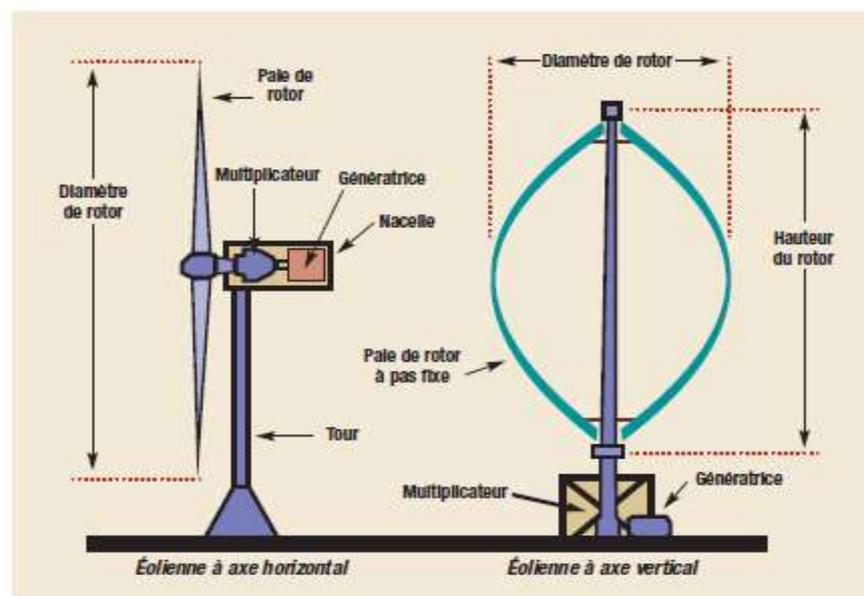


Figure I.14: Schéma d'un dispositif éolien à axe verticale et horizontale.

D) L'énergie de biomasse

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale pour la transformation de ces résidus en énergie (chaleur, gaz, carbone).

Grâce à la valorisation de la biomasse, on peut obtenir de l'électricité, de la chaleur et des carburants propres appelés, biocombustibles ou biocarburants liquides ou gazeux, tels que le biogaz, le bioéthanol et le biodiesel. Ces carburants sont utilisés soit purs, ou en mélange avec des carburants d'origine fossile.

L'Algérie, un pays situé dans une zone aride, est en effet vulnérable aux effets du réchauffement climatique. De plus le gisement national de biomasse valorisable en bioénergie est important en termes de quantité et est très varié.

La biomasse est donc une source d'énergie renouvelable que si sa régénération équivaut à sa consommation. Ainsi, par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres [19].

Cette énergie est divisé en trois catégories sont :

- Bioénergie.
- Biogaz.
- Biocarburant [19].

I.3 Conclusion

- Le potentiel national en énergies renouvelables est fortement dominé par le solaire.
- Les potentiels en éolien, en biomasse et en géothermie, comparés à celui du solaire, sont beaucoup moins importants, alors que le potentiel hydroélectrique est très faible.
- Les coûts des filières d'énergies renouvelables, bien qu'élevés actuellement, par rapport à la filière classique (en dehors de celle de l'éolien qui est déjà compétitive) devraient chuter sensiblement au cours des 20 prochaines années.
- Pour la production d'électricité d'origine renouvelable, l'objectif global du programme des énergies renouvelables fait l'objet de l'installation de 22000 MW à l'horizon 2030, dont 10 000 MW pourraient être dédiés à l'exportation.

- La part du programme d'énergies renouvelables destinée à l'exportation sera mise en œuvre en partenariat avec le marché européen si l'accès de ce dernier est garanti.
- Pour le marché national, la concrétisation de l'objectif du programme permettra, à l'horizon 2030, l'électricité d'origine renouvelable de représenter 40% de la production nationale d'électricité [20].

ÉNERGIE SOLAIRE ET
DESCRIPTION DU SYSTÈME
PHOTOVOLTAÏQUE

II Introduction

Le générateur photovoltaïque transforme l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique, sous forme de courant continu directement utilisable. Du point de vue technique, on estime que les systèmes de conversion à énergie solaire sont potentiellement capables de répondre à une grande partie de la demande énergétique mondiale.

La transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque est un des moyens d'exploitation du gisement solaire. Elle est réalisée par des cellules photovoltaïques. Il est à noter qu'en dépit de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans la cellule, ni sous forme chimique, ni sous aucune énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule sous obscurité totale va se comporter comme un composant passif. La cellule solaire ne peut être assimilée à un autre générateur classique d'énergie électrique de type continu.

Elle n'est ni une source de tension constante ni une source de courant constant. Elle possède des caractéristiques non linéaires dépendant de l'éclairement.

Actuellement, le rendement de conversion d'énergie solaire en énergie électrique est encore faible (le rendement le plus élevé aujourd'hui en laboratoire est de 25%) et sous un ensoleillement nominal de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Ce faible rendement des sources photovoltaïques a incité les utilisateurs à exploiter le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur PV. Ce maximum est généralement obtenu en assurant une bonne adaptation entre le générateur PV et le récepteur associé.

L'adaptation se fait à l'aide de convertisseur statique contrôlé (onduleur) pour différents modes de fonctionnement. Comme la puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible, il est nécessaire de disposer d'association en série et en parallèle de telles cellules pour obtenir des modules de puissance compatibles avec le matériel électrique usuel [21].

II.1 Définition

Le photovoltaïque est une énergie renouvelable issue du soleil. Il utilise directement le rayonnement solaire pour transformer la lumière en courant électrique grâce à l'effet photovoltaïque (figure II.1). L'activité est produite à partir de la lumière du jour et pas seulement par l'exposition au soleil.

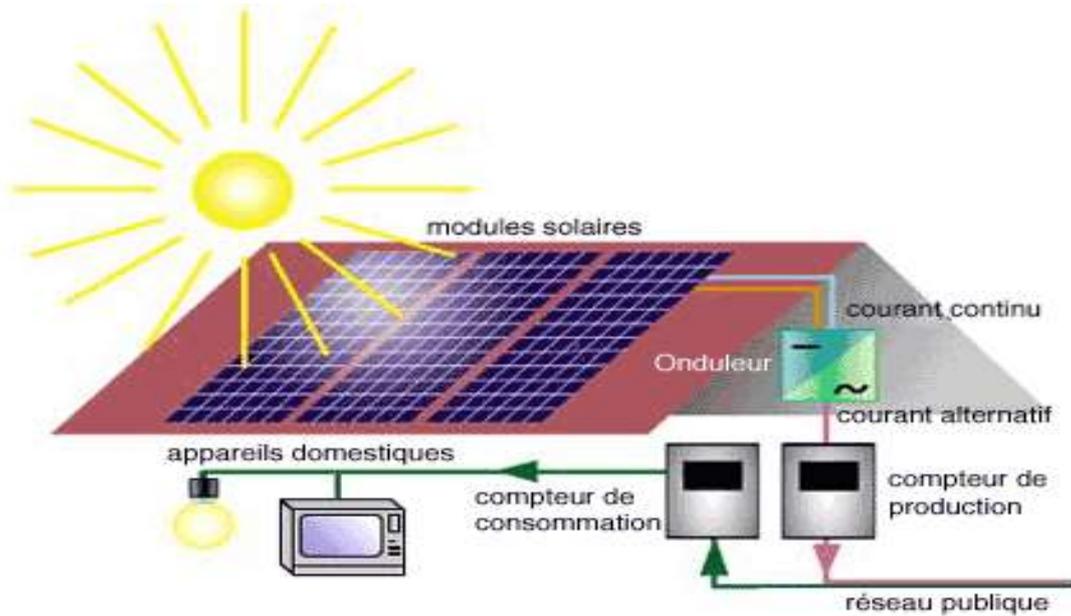


Figure II.1: schéma simplifié du principe du photovoltaïque

La lumière est transformée en électricité au moyen de modules photovoltaïques composé de plusieurs cellules solaires reliées entre elles. L'électricité produite correspond à un courant continu (CC, comme celui des batteries. Pour l'utiliser en secteur ou pour alimenter des appareils fonctionnant en courant alternatif. Il doit être converti en courant alternatif à l'aide d'un convertisseur CC/CA appelé aussi onduleur. C'est le cas pour les installations photovoltaïque raccordées au réseau du bâtiment et /ou du distributeur, représentant aujourd'hui près de 90% du marché mondial. Les modules photovoltaïques doivent être associés à d'autres composants afin de garantir une alimentation électrique fiable l'ensemble constitue un système photovoltaïque (figure II.2).

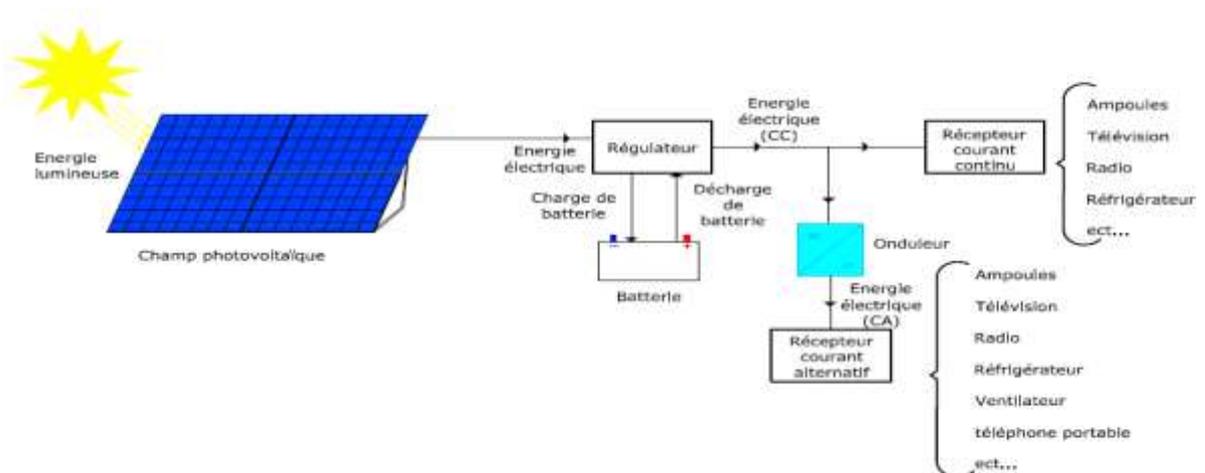


Figure II.2: Schéma du système photovoltaïque

L'impact de cette technologie sur l'environnement est minimale. Elle ne génère aucune nuisance : ni gaz à effet de serre ni déchet. La majeure partie de cet impact est due à la consommation des panneaux, le cadmium par exemple [22].

II.2 Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une :

- Cellule photovoltaïque : Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment
- Un panneau solaire(ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés
- Champ photovoltaïque : Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque-ou la technologie associée.



Figure II.3: cellule photovoltaïque Panneau photovoltaïque Champ photovoltaïque [23] .

II.2.1 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », découvert par E. Becquerel en 1839. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne. Comme indiqué dans le figure ci-dessous figure II.4

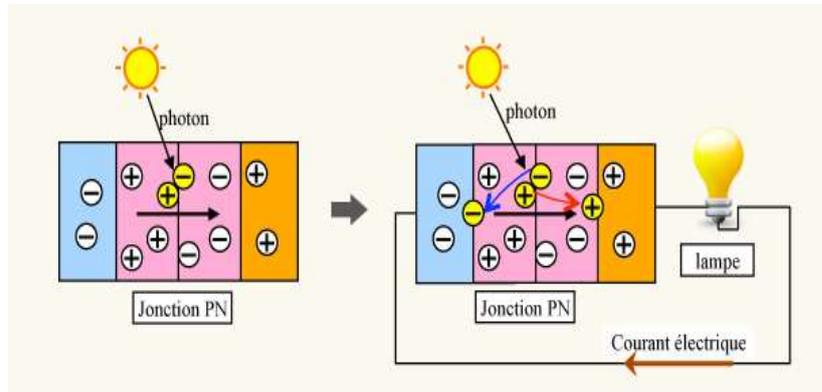


Figure II.4: présentation schématique d'une cellule solaire, jonction PN.

II .2.2 Le module solaire photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (II.4) ; Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl-acétate) , et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [24].

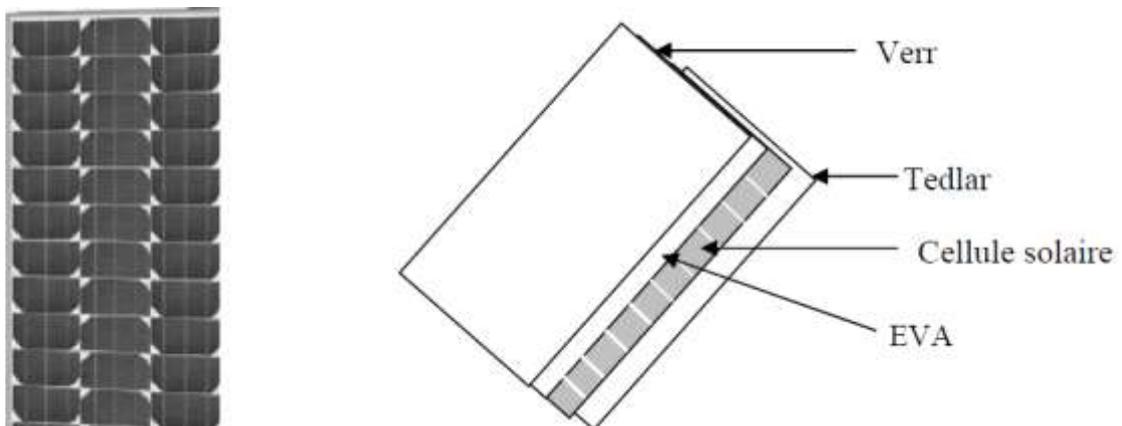


Figure II.5: le module solaire photovoltaïque

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant deux diodes

Antiparallèles figure (II.6). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [25].

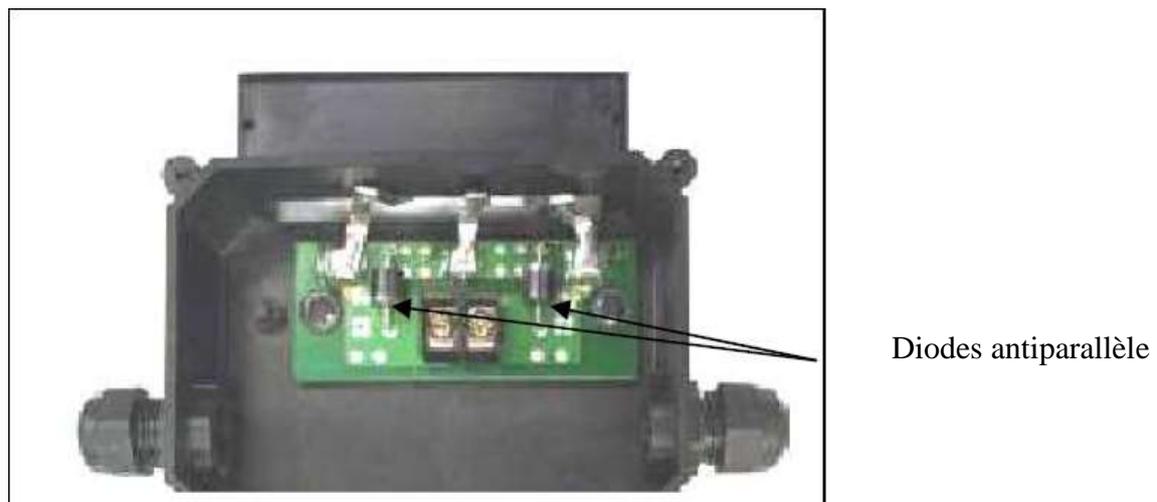


Figure II.6: Boîte de jonction [25].

Les panneaux solaires photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

Les modules en silicium mono cristallin (c-Si, 64% de marché), poly cristallin ou multi Cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-Si, 13% du marché), délivrent des tension normalisées (12, 24,48) et des puissances entre 10 et 100 Wc (watt-crête Puissance obtenue pour (l'ensoleillement maximal) [24].

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium Cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [26].

a) Caractéristiques d'un le panneau solaire

- ✓ La puissance de crête, P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- ✓ La caractéristique I/V : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- ✓ Tension à vide, V_{CO} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- ✓ Courant de court-circuit, I_{CC} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- ✓ Point de fonctionnement optimum, (U_m, I_m) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m * I_m$
- ✓ Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- ✓ Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} * I_{cc}$

II .2.3 champ photovoltaïque

Champ solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules figure II.7: sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure II.7: Installation solaire [8].

II .3 L'effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque PV est la transformation directe de la lumière en électricité. A l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer(ou le refroidir),et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur(liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (on pense au chauffe-eau),l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque, c'es-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observé la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [27].

Les coûts d'installation pour la production d'énergie électrique d'origine solaire n'on pas encore atteint le niveau des coûts des autres producteurs qui alimentent les réseaux. De ce fait, le coût de production du KWh est encore supérieur au prix moyen de l'électricité en Europe.

Il en résulte que le photovoltaïque s'est principalement développé jusqu' à maintenant par l'acquisition de petites parts de marché, ou << niches économiques >>.Il s'agissait principalement de l'alimentation de consommateurs isolés, non raccordés au réseau. Pour lesquels l'alternative photovoltaïque était économiquement intéressante. La plupart de ces installations concernent des consommateurs relativement modestes, tels que chalets de Week-end, cabanes de clubs alpins, relais hertziens, station de pompage, signalisation routière et ferroviaire, etc. Leur puissance photovoltaïque installée varie entre quelque dizaine et quelques centaines de Watts, et le stockage s'effectue habituellement avec des batteries.

Il n'en va plus de même depuis que des préoccupations touchant à la protection de l'environnement et à la conservation des ressources commencent à intervenir dans le choix des techniques et des énergies de demain. L'énergie photovoltaïque est potentiellement une source d'énergie inépuisable et relativement plus acceptable pour notre environnement. En outre, l'évolution des coûts à long terme, à la hausse pour les énergies non renouvelables et

à la baisse pour le photovoltaïque, en fera un partenaire concurrentiel pour alimenter les réseaux dans quelques années.

Il n'en faut pas davantage pour que les autorités responsables et les organisations professionnelles intéressées s'efforcent déjà de prévoir le développement de cette nouvelle source d'énergie par des programmes d'encouragement et des se situe actuellement un marché pour une nouvelle forme de générateurs photovoltaïques raccordés au réseau, qui sont la préfiguration des centrales photovoltaïque de demain, et dont la puissance installée varie entre quelques KW et quelque centaines de KW.

II.4 Le potentiel du photovoltaïque en Algérie

L'office fédéral de l'énergie (OFEN) a publié deux études qui montrent que les installations photovoltaïques peuvent couvrir environ 10% de la consommation électrique de l'Algérie.

Les surfaces nécessaires se trouvent sur les immeubles, les parkings ou le long des voies ferrées et des autoroutes. Va la croissance du marché, la fabrication des générateurs photovoltaïques et des onduleurs prendra une telle ampleur que l'on peut s'attendre à d'importantes réductions de prix, par sa nature même, la photovoltaïque aura des retombées économiques sur des nombreux secteurs de l'économie suisse; mais en revanche, son implantation sera lente. Il est vraisemblable que trente à quarante années seront nécessaire pour construire les centaines de milliers de petites centrales photovoltaïques qui, ensemble, fourniront les 10% de notre consommation d'électricité. C'est une des raisons pour les quelles l'industrie et l'économie doivent être aidées au début de ce démarrage, mais c'est aussi l'occasion de s'investir dans cette industrie d'avenir [28].

II.5 Les performances d'un système PV

Les modules photovoltaïques se composent de cellules associées en plusieurs rangées. En dépit des avancées technologiques enregistrées ces dernières années, le rendement global des systèmes PV est d'environ 12%.

La puissance crête délivrée par un module PV est souvent approximée par une relation linéaire

$$PPV,DC = \eta_{PV} \times I_{pv}$$

PPV,DC : puissance délivrée.

η_P : rendement des modules PV.

η_{inv} : puissance solaire reçue sur toute la surface du champ PV.

la puissance délivrée, par l'onduleur est donnée par :

$$PPV,AC = \eta_{inv} \times P_{PV,DC}$$

PPV,AC : puissance AC délivrée par l'onduleur .

η_{inv} : rendement de l'onduleur.

II.6 Les types d'une installation de système PV

Les systèmes PV sont partagé en trois types : Autonomes, et hybrides, et reliés au réseau :

II.6.1 Systèmes autonomes

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique.

Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie.

Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé aux déserts, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique .

L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil [29].

Les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur.

II.6.1.1 Description des éléments d'un système photovoltaïque autonome

Le système photovoltaïque autonome se compose principalement des éléments suivants :

- Un champ photovoltaïque constitué d'une association série/parallèle des modules photovoltaïques.
- Un système de régulation de charge (régulateur).
- Un système de conversion DC/AC (onduleur),
- un système de stockage électrochimique (batterie).

La figure II.8 suivante montre Schéma d'un system photovoltaïque autonome.

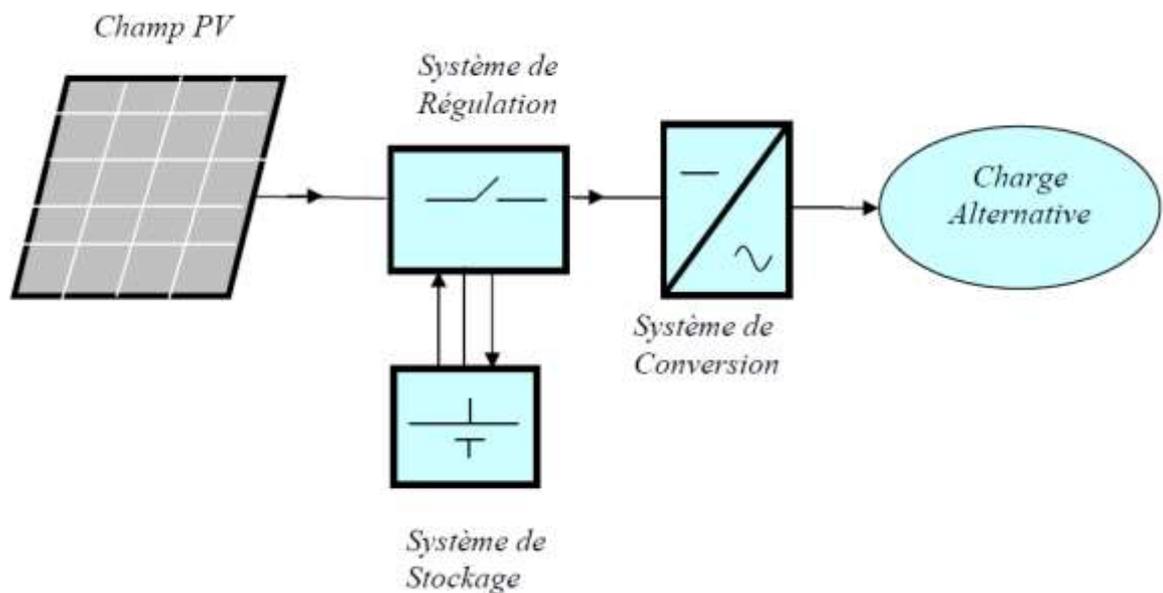


Figure II.8: Schéma d'un system photovoltaïque autonome [8].

A) système de stockage

Il existe plusieurs types de stockage de l'énergie parmi lesquels nous pouvons citer :

- Les batteries
- Le pompage eau
- Le volant d'inertie
- L'hydrogène
- Etc.

Une installation photovoltaïque autonome (dite aussi site isolé) comporte une ou plusieurs batteries spécifiques sont appelées " batterie à décharge lente " (ou pour simplifier batterie solaire).

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite s'envisager des stockages suivant les conceptions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales :

Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)

fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV [8].

1) Définition d'une batterie solaire

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert).

Une batterie utilisée avec des panneaux solaires est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires ou éoliennes. Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes.

Vous pouvez brancher une batterie solaire directement sur un panneau solaire, mais vous risquez d'endommager la batterie si son niveau de charge dépasse les 90%. C'est pour cela qu'il est vivement recommandé d'installer un régulateur solaire entre le panneau solaire photovoltaïque et la/les batteries solaires [30].

2) Caractéristiques d'une batterie

Les caractéristiques principales d'une batterie sont :

✓ Capacité de stockage en Ampère heure

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant. Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

✓ **Rapports de chargement et déchargement**

Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

✓ **Température**

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 °C. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.

✓ **La durée de vie**

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année ou en nombre des cycles.

Profondeur de décharge

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle. La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager. Les fabricants de batteries de nickel- Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucuns dommages.

La tension d'utilisation

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

Le rendement : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

Le taux d'autodécharge

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné [8].

3) Type de batterie utilisée

Il existe deux principaux types de stockage de l'énergie électrique dans le système PV sous forme électrochimique qui sont :

➤ Les Accumulateurs au plomb-acide

La batterie au plomb acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale [11].

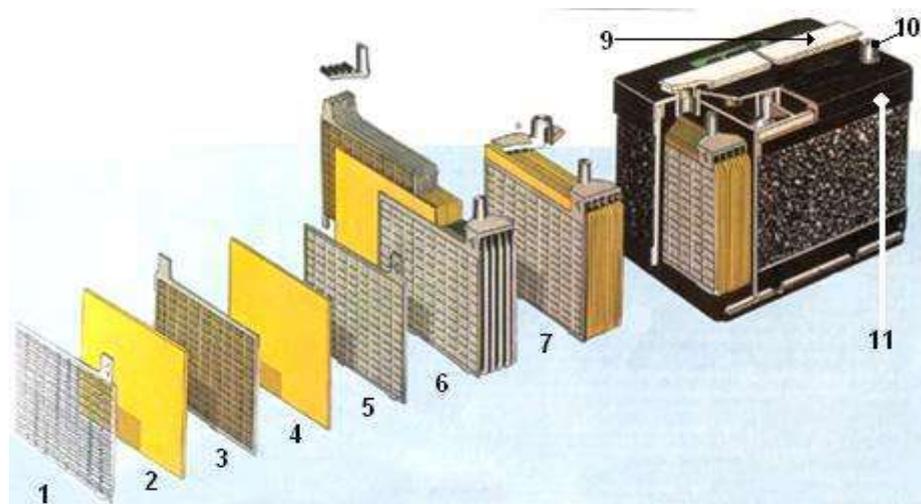


Figure II.9: batterie au plomb acide

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1 : Grille. | 7 : Élément complet |
| 2 : Séparateur. | 8 : Pont |
| 3 : Plaque positive. | 9 : Rampe de bouchons. |
| 4 : Plaque négative. | 10 : Borne. |
| 5 : Barrette. | 11 : Bac |
| 6 : Faisceau négatif. | |

➤ Les Accumulateurs au Nickel- cadmium

Les batteries de nickel- Cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb-Acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium.

La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts, par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%. En dépit d'un prix encore prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- ✓ Très bonne résistance mécanique.
- ✓ Possibilité de supporter des décharges profondes.
- ✓ Pas d'émanations toxiques à partir de l'électrolyte.
- ✓ Ne craint pas de gel.

4) Types d'accumulateurs

Parfois, appelée 'accumulateur', une batterie est destinée à emmagasiner de l'électricité.

Le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique. Nous résumons dans le tableau suivant,

Tableau I.1: Type de batterie existant actuellement sur le marché

Type de batterie	Propriétés	Puissance inférieure (Wh / kg)	Coût
Plomb - acide	Fiable, recyclable, avec entretien	35	Pas trop chère
Scellée plomb - acide	Entretien nul, utilisée dans n'importe quelle position	39	Pas très chère

Bipolaire plomb - acide	Recharge rapide permise et surtout durable	50	Très chère
Nickel - Cadmium	Toxique, effet de mémoire	45	Très chère
Nickel - Fer	Non toxique, durable	55	Très chère
Nickel – Métal hydrure	Non toxique, durable	90	Très chère
Zinc - Bromure	Analogue à la précédente mais très toxique	90	Très chère
Sodium - Sulfure	Fonctionne à 300 °C ; d'où danger d'incendie	110	Très chère
Lithium – Ion (SAFT)	Sûre, puissante, formes diverses	150	Très chère

B) Système de régulation

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, des petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales:

- ✓ la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- ✓ L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur la quelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension préétablis : seuil haut et seuil bas[8].

Il existe deux types de régulation:

❖ Régulation de décharge

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension pré réglé bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête de décharge lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil[8].

Il existe plusieurs types de montage de régulation de charge pour les batteries au plomb[8].

1) Régulation de charge série

Le principe consiste à intercaler entre le panneau PV et la batterie un dispositif qui module le courant. Le dispositif fonctionne de la manière suivante :

Tant que la tension U_{bat} aux bornes de la batterie est inférieure à la tension de la diode Zener U_Z , le courant délivrer par le panneau charge la batterie à travers un transistor se bloque, et le courant ne passe qu'à travers la résistance [8].

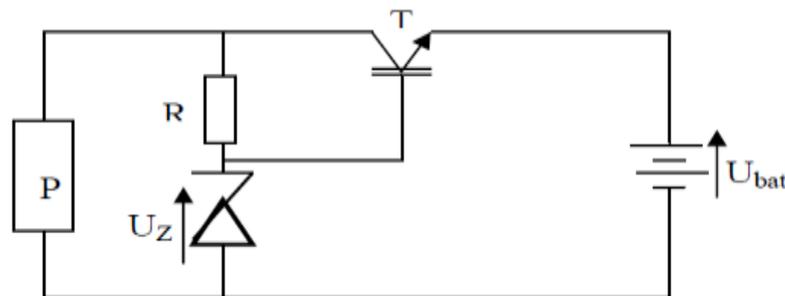


Figure II.10: Schéma de principe d'un régulateur de charge série.

2) Régulateur de charge de coupure

Ce régulateur comporte un relais qui connecte et déconnecte le générateur PV à deux seuils différents et qui sont commandés par une unité de contrôle. Ils mesurent en permanence la tension aux bornes de la batterie [8].

c) Régulateur de charge à découpage :

Ce type de régulateur utilise un convertisseur continu - continu qui délivre à la batterie sa tension de floating chaque fois que la tension de la batterie atteint le seuil haut [25].

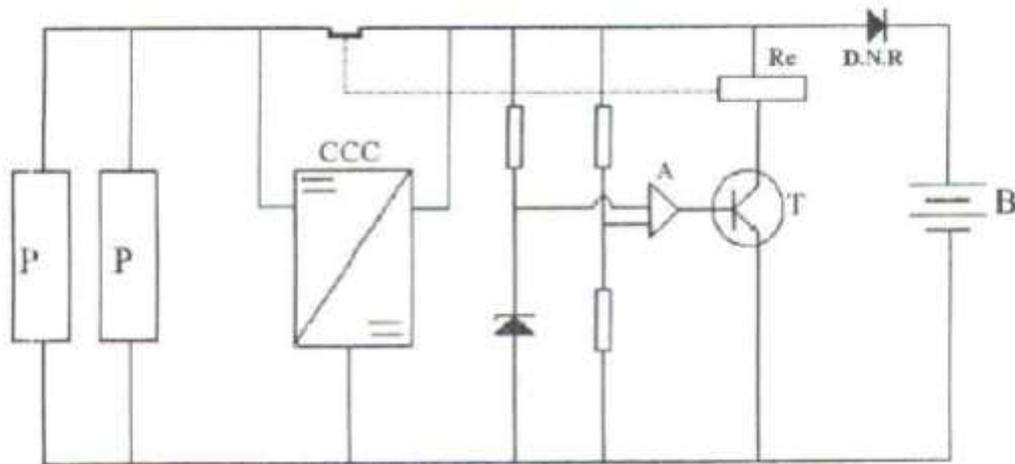


Figure II.11: Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage.

3) Régulateur de charge série à coupure partielle

Ce type de régulateur permet de fractionner le panneau PV en deux parties. Chacune délivrer une même tension selon le principe suivant : une partie du panneau charge la batterie à travers un régulateur de charge série à coupure tant que l'autre partie est branchée directement pour la charge de la batterie en permanence[8].

4) Régulateur de charge parallèle

Ce type de régulateur est utilisé en dérivation sur le panneau solaire. Il permet de dissiper l'énergie excédentaire sous forme calorifique grâce à des composants de puissances selon le principe suivant:

Lorsque la tension de la batterie est faible, le transistor T est bloqué, le courant et la tension aux bornes de la résistance est faible alors tout le courant délivré par le générateur charge la batterie. Si la tension aux bornes de la diode Zener atteint la valeur de référence, le courant I augmente brusquement, le transistor T devient passant et il délivre une partie du courant de charge[8].

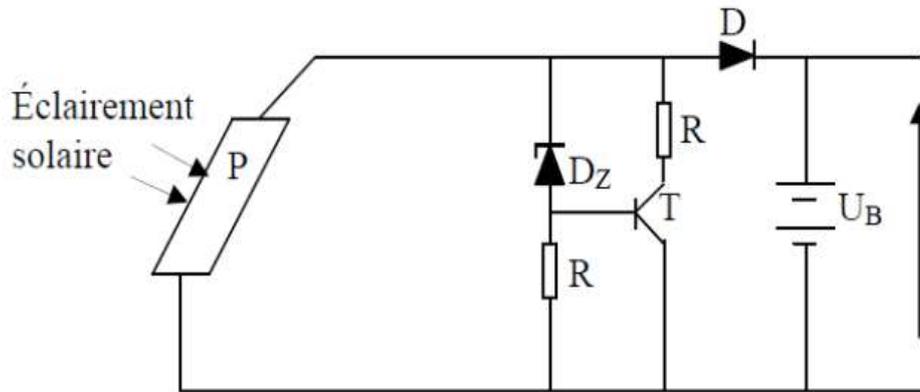


Figure II.12: Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle

C) Système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu continue), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif) [8]

Un onduleur est un appareil électronique qui transforme un courant continu en courant alternatif sinusoïdal. Dans notre cas il reçoit le courant produit par les capteurs photovoltaïques (tension continue variant entre 120 et 400 volts) et produit un courant alternatif d'une tension de 220 à 240 volts et de fréquence 60 hertz.

1) Le convertisseur continu -continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal.

Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95%.

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important [8].

2) Le convertisseur continu- alternatif

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

- **Rotatif** : C'est un moteur a courant continu couplé a un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW.

Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité.

Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).

- **Statique** : on le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes a vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (Pulse Width Modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système, on obtient :

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.

- De faibles pertes à vide.

La figure (II.13) illustre un onduleur triphasé autonome à fréquence variable à commutation forcé de type MLI (Modélisation, de Largeur d'Impulsion) opéré en source de tension .Il est alimenté à partir de la tension continue générée conjointement par le redresseur et le hacheur série, il est réalisé à base de transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Le choix de ce type de composant relève, d'une part de sa particularités à pouvoir commuter de très grandes valeurs de courant et tension à des fréquence de découpage de plusieurs dizaines de KHz et d'autre part, parce qu'il permet la suppression de tout les circuits d'aide à la commutation des montages à thyristors [32].[8]

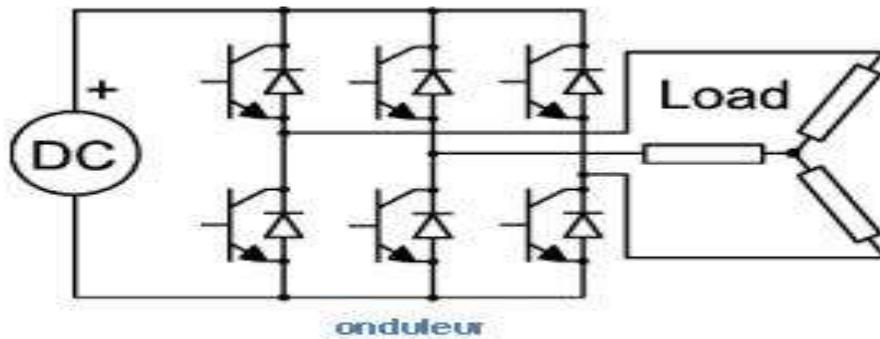


Figure II.13: schéma de l'onduleur triphasé

➤ La puissance nominale

C'est la puissance exprimée en VA que le convertisseur est capable de délivrer en fonctionnement permanent. Théoriquement, le choix de la puissance à délivrer doit être la somme des puissances des équipements installés ou à installer, mais en pratique, il est rare que tous les appareils fonctionnent en même temps et le choix de la puissance nominale résultera de la valeur maximale du profil moyen de la consommation.

➤ Le rendement

C'est un critère très important, car il influe sur le dimensionnement du champ PV et de la batterie. Celui-ci varie en fonction du taux de charge (rapport de la puissance de sortie et de la puissance nominale), ainsi que la variation de ce rendement varie d'un onduleur à un autre. Le rendement de l'onduleur est aussi donné entre l'énergie consommée par la charge et l'énergie fournie par la source continue.

La consommation à vide

Une consommation importante à vide va réduire l'énergie emmagasinée par la batterie (cas de nuit). Pour cette raison, il est important de limiter les pertes à un faible pourcentage de la puissance nominale (1 à 5%). Pureté de la tension sinusoïdale pure (220V – 50Hz). La plus ou moins grande pureté de la tension de sortie est obtenue grâce à :

Un système de régulation qui tend à maintenir la tension et la fréquence aux valeurs nominales, quelle que soit la tension d'entrée.

Un filtrage en sortie de l'onduleur, qui tend à lisser la forme de la tension donc à réduire le taux d'harmonique[8].

D) charge

Les charges électriques rendent utile une puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistive et inductive. Les charges résistive incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau, etc.

Les appareils utilisant des machines électrique sont des charge résistive et inductive. Ils sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent aussi avoir des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont des variations transitoires de tension et de courant pendant les changements de fonctionnement du système[21].

II.6.2 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés

II.6.3 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité.

II.7 Avantages et inconvénients d'une installation PV

Les contraintes majeures dues à l'utilisation du PV sont son cout exorbitant et son faible rendement. Quelques avantages et inconvénients des systèmes PV sont résumés dans le tableau suivant:

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients d'une installation PV [27],[28]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cout d'exploitation quasi inexistant ✓ Durée de vie pouvant dépasser 20 ans ✓ Impacts environnementaux moindres (sans émission de CO₂) Expansion facile (rajout de panneaux) ✓ Disponibilité locale de la ressource solaire (nul besoin de transporter la ressource) ; ✓ Absence de nuisances sonores ; Grande fiabilité. ✓ L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville ✓ L'énergie photovoltaïque est renouvelable et gratuite ✓ La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voire de générer des revenus ✓ Le contrat d'achat est conclu pour une durée de 20 ans 	<ul style="list-style-type: none"> Cout d'investissement très élevé Faible rendement, en général inférieure à 12% Energie intermittente dépendante de l'ensoleillement (fluctuation de l'énergie au cours de la journée) Fonctionnement de nuit impossible ✓ Energie intermittente dépendante de l'ensoleillement (fluctuation de l'énergie au cours de la journée); ✓ Fonctionnement de nuit impossible ✓ Difficulté d'ajouter des charges supplémentaires non prévues. ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente ✓ Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante ✓ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes

II.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque autonome (champ PV, régulateur, batterie et onduleur). Aussi que les principes de fonctionnement de chaque élément.

Dans le prochain chapitre on a utilisé ces éléments pour fait une étude et dimensionnement d'une l'hybridation entre station photovoltaïque et le groupe électrogène.

**COMPOSANTES DES SYSTÈMES
HYBRIDES PV/ GROUPE
ÉLECTROGÈNE**

III Introduction

Les systèmes hybrides sont utilisés le plus souvent dans des sites éloignés qui se caractérisent par un climat aride tel que le Sahara Algérien où le potentiel solaire est important. L'objectif de ces systèmes, lorsqu'ils travaillent en mode autonome, est d'alimenter sans interruption une maison ou un village [31]. Les systèmes autonomes contiennent souvent des batteries [32] mais aussi d'autres dispositifs de production d'énergie électrique.

III.1 Définition

Un Système d'Energie Hybride (SEH) est un système qui associe au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs diesel, et au moins une source d'énergie renouvelable [34]. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Les SEH sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Le but d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et si possible de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergies renouvelables, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie. D'un point de vue technologique, la fiabilité n'est pas seulement une question de respect des normes pour l'alimentation en électricité, mais aussi de maintenance, compte tenu des conditions particulières des régions isolées.

Les performances d'un SEH, son rendement et sa durée de vie, sont influencés en partie par sa conception, c'est-à-dire l'architecture, le dimensionnement des composants, le type de composants etc., et d'autre part par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ces performances sont :

- ✓ la consommation spécifique du groupe électrogène,
- ✓ le nombre et la durée des pannes,
- ✓ le nombre d'arrêt pour l'entretien,
- ✓ le coût du kWh...

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesel 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. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus [35] : 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'énergie renouvelable 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, charges optionnelles, 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 des batteries de stockage et des charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelables et des générateurs diesel), 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.

III.2 Générateur Diesel

Pour assurer la continuité de production d'énergie électrique dans un réseau autonome il est nécessaire de recourir au stockage d'énergie ou d'ajouter un ou plusieurs générateurs diesel. Dans un système hybride PV/Diesel, le générateur classique est généralement constitué d'un moteur diesel qui est couplé à un générateur synchrone (figure III.1 ci-dessous). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un régulateur de vitesse. Le régulateur fonctionne en ajustant le flux de carburant de façon à garder la vitesse du moteur diesel et la vitesse du générateur synchrone constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

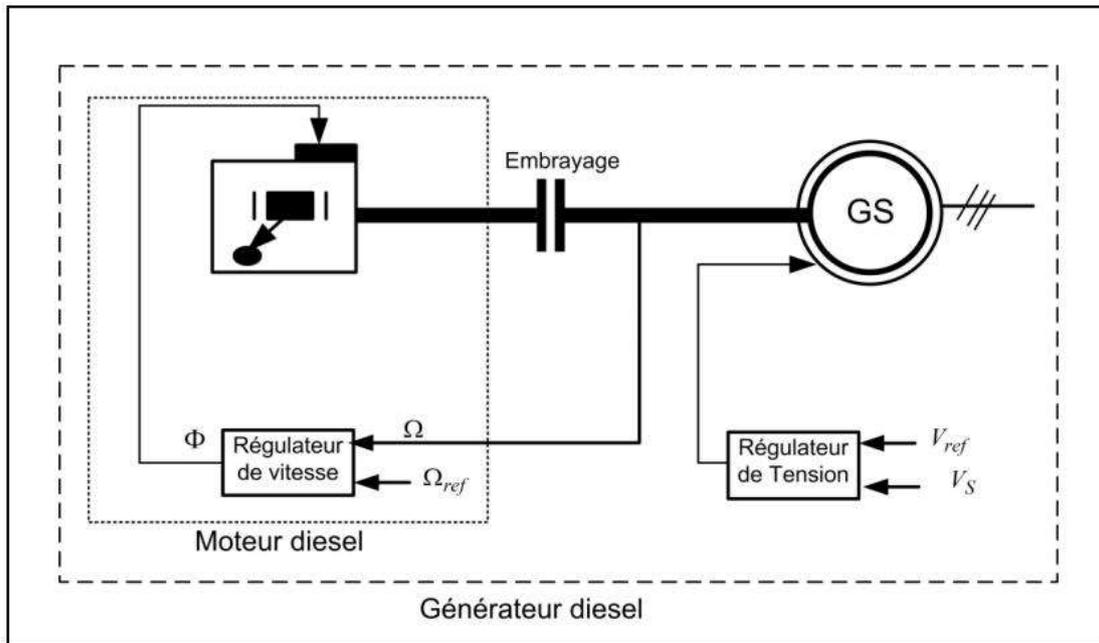


Figure III.1: Configuration du moteur diesel [39]

Le groupe électrogène est constitué d'un moteur Diesel qui fait tourner un alternateur. Le fonctionnement normal du générateur est le suivant : le couple fourni à l'alternateur par le moteur fait tourner le rotor de l'alternateur, ce qui génère des courants triphasés au stator.

Lorsque la puissance du GE change de sens (cas de configuration parallèle), le fonctionnement du GE est modifié. En effet, le courant circule dans le sens inverse : il est absorbé par l'alternateur et contribue à créer un couple qui va faire tourner le rotor et ainsi entrainer le moteur Diesel qui est couplé avec l'alternateur. Ce phénomène est connu sous le nom de monitoring car la machine synchrone fonctionne alors comme un moteur. Dans le cas de GE reliés au réseau, ce phénomène arrive lorsque l'alimentation du moteur Diesel est coupée ou insuffisante. En effet, lorsqu'il n'y a plus assez de couple pour faire tourner l'alternateur à la vitesse du réseau, celui-ci absorbe de la puissance du réseau et continue à tourner à la même vitesse (imposée par la fréquence du réseau). Dans le cas des systèmes d'énergie hybrides, le retour de puissance peut conduire à l'effondrement du système s'il est conséquent et prolongé. Lorsqu'une charge inférieure à la production de la source renouvelable est imposée, la fréquence du réseau crée par le GE augmente très rapidement et le système s'effondre à cause de la survitesse [37].

Le mécanisme mis en jeu est celui de la régulation de la vitesse du moteur Diesel. Un régulateur agit sur l'admission de combustible dans le moteur afin de maintenir constante. Par son principe même, le régulateur ne modifie la position de la vanne d'admission que si la vitesse de la machine varie. Quand la vitesse augmente, le régulateur diminue l'admission et la puissance décroît ; quand la vitesse diminue, le régulateur augmente l'admission et la puissance croît.

III.2.1 Les performances des groupes électrogènes

Généralement les performances d'un groupe électrogène sont caractérisées par sa consommation horaire, ainsi que sa consommation spécifique.

La consommation d'un groupe de 30 kW est donnée par la figure III.2 .

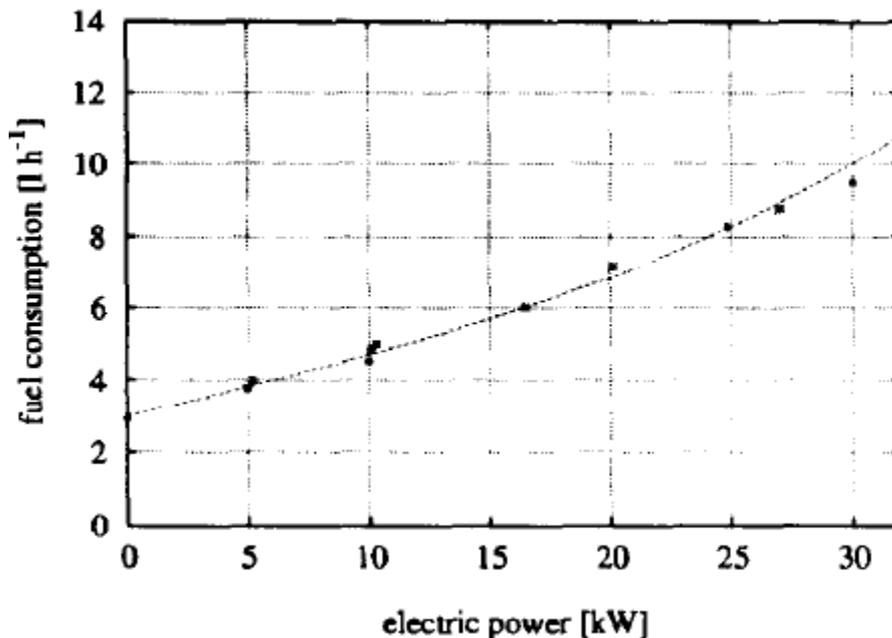


Figure III.2: consommation d'un groupe de 30 kW (13)

Un fonctionnement intermittent du groupe électrogène, c'est-à-dire avec de nombreux cycles de démarrage – arrêt, provoque une usure prématurée des pièces, ce qui accroît les besoins en maintenance. Pour pouvoir répondre, à une brusque augmentation de la demande en énergie, le groupe électrogène fonctionne avec une réserve tournante, c'est-à-dire que le groupe produit un surplus d'énergie. Le fonctionnement sous faible charge des groupes électrogènes n'est pas recommandé, à cause de l'usure des pièces ; généralement les constructeurs recommandent de tourner le groupe à une puissance supérieure ou égale à 30% de sa puissance nominale.

L'utilisation optimale du groupe électrogène est réalisée lorsqu'il fonctionne à une charge correspondant à 80% de sa charge nominale. Comme le montre la figure III.3, le coût de l'énergie produite par un groupe électrogène est favorable lorsqu'il fonctionne proche de sa puissance nominale

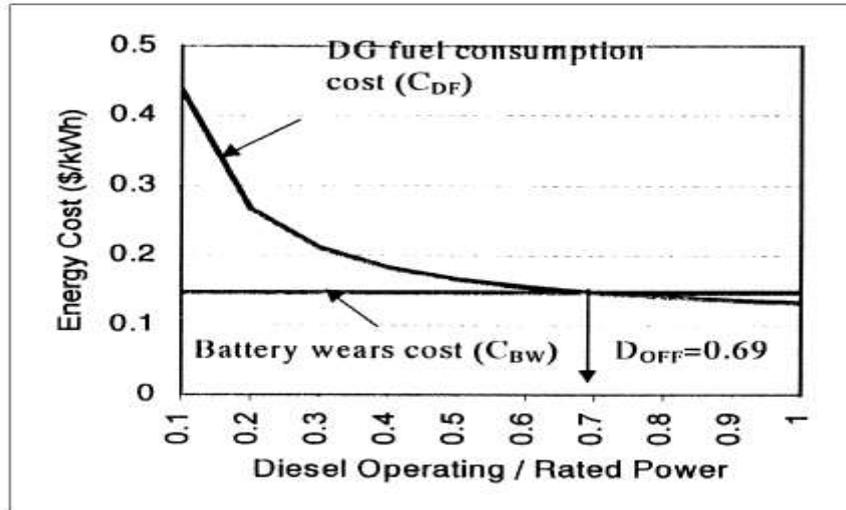


Figure III.3: coût d'exploitation en fonction du taux de charge du groupe

III.2.2 Avantages et inconvénients des groupes électrogènes

Quelques avantages et inconvénients des groupes électrogènes sont résumés dans le tableau suivant tableau III.1.

Tableau III.1: Avantages et inconvénients d'une groupes électrogènes[4].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Coût initial faible ; ➤ Fonctionnement avec une réserve tournante ; ➤ Disponibilité 24/24 heures 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Utilisation d'énergies fossiles avec ses corolaires ; ➤ Faible rendement aux faibles charges ; ➤ Coûts d'exploitation élevés ; ➤ Nécessité de maintenance continue (main d'oeuvre qualifiée et pièces de rechanges); ➤ Nuisances sonores ; ➤ Emissions de CO2.

III.3 Systèmes hybrides de production d'électricité

Les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables sont les Systèmes d'Énergie Hybrides (SEH). Ces systèmes combinent et exploitent plusieurs sources disponibles interconnectées entre elles pour fournir l'alimentation électrique, en général une ou plusieurs sources conventionnelles (groupe électrogène) et au moins une source d'énergie renouvelable. Plusieurs classifications des systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi, figure III.4 [38].

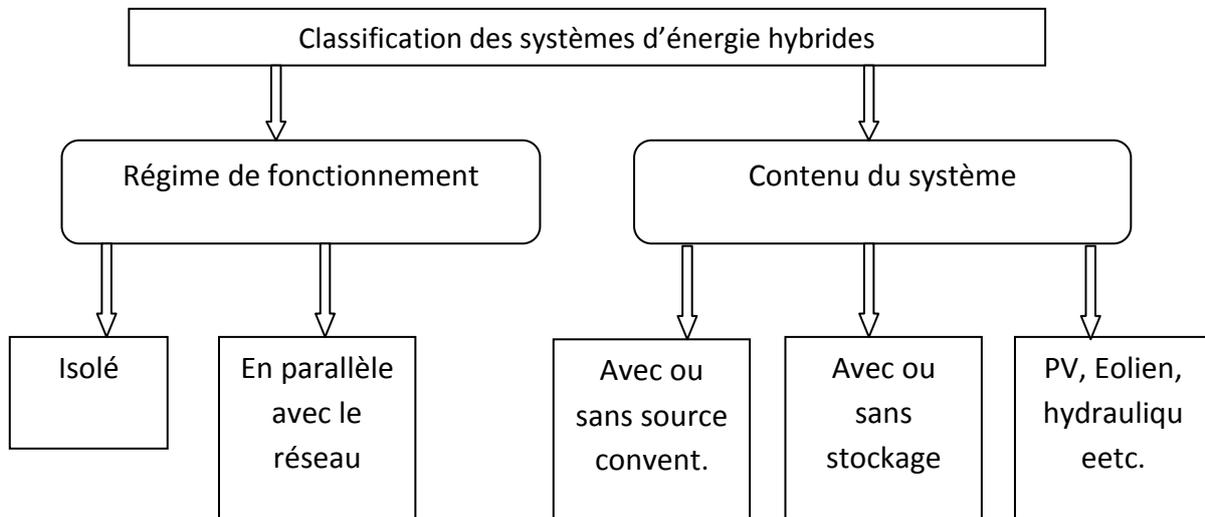


Figure III.4: Classification des systèmes d'énergie hybrides

Le but d'un système d'énergie hybride est d'assurer la fourniture de l'énergie demandée par la charge et de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable. Les performances d'un SEH, le rendement et la durée de vie sont influencés en partie par sa conception (dimensionnement des composants, types de composants, architecture) et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement.

La puissance délivrée par les SEH peut varier de quelques watts jusqu'à quelques mégawatts. Ainsi, pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte combinant bus à courant alternatif (CA) et bus à courant continu (CC) avec des batteries de stockage est très répandue. Le système de stockage utilise un nombre élevé de batteries de stockage pour être

capable de couvrir la charge moyenne pendant plusieurs jours. Ce type de SEH utilise de petites sources d'énergie renouvelable connectées au bus à CC. Quand il existe une production en CA, elle vient des générateurs diesel. Une autre possibilité est de convertir la puissance continue en puissance alternative à l'aide des onduleurs. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (< 5 kW) alimentent généralement des charges à CC. Les systèmes plus grands (puissance > 100 kW) sont centrés sur le bus à CA, avec des sources d'énergie renouvelable conçues pour être connectées aux grands réseaux interconnectés.

Dans les SEH, les panneaux photovoltaïques et les générateurs diesel sont souvent utilisés. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydraulique, géothermique, marémotrice ou l'énergie contenue dans l'hydrogène ; ces systèmes comportent aussi des convertisseurs, des charges et une forme de gestion de l'énergie. Les batteries sont utilisées pour le stockage d'énergie.

III.4 Structure du système hybride

Pour structurer un système hybride, trois critères peuvent être pris en compte :

- La présence ou non de sources d'énergie classique, comme un groupe électrogène, une micro turbine à gaz, etc. La présence ou non de dispositifs de stockage.
- La présence d'un stockage permet de satisfaire la demande des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une source primaire à convertir en électricité (soleil). Ces dispositifs peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoir d'hydrogène, etc.
- La structure du système peut contenir des modules photovoltaïques, un convertisseur d'énergie hydraulique ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection des sources utilisées est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le profil de consommation de la charge électrique alimentée. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle[21].

III.5 Les différentes configurations des technologies hybrides PV/Diesel de production d'électricité

Le concept d'« électricité décentralisée » (production de l'électricité sur le lieu même de son utilisation), a encouragé le développement des moyens de production d'origine renouvelable.

La tendance actuelle montre que l'intégration de ce type de ressources dans les systèmes électriques isolés (systèmes insulaires, réseaux villageois) se fait en association avec l'utilisation des ressources conventionnelles, tels les générateurs Diesel. Cette partie est consacrée à l'étude des systèmes avec association des générateurs photovoltaïque et Diesel.

Le générateur photovoltaïque génère du courant continu, mais la consommation domestique exige le plus souvent du courant alternatif, c'est pourquoi il est nécessaire d'adjoindre au système un onduleur pour la conversion du courant continu en courant alternatif. De cette façon, le générateur photovoltaïque travaille soit en parallèle, soit en alternance avec le générateur Diesel.

Il existe, en conséquence, plusieurs configurations de systèmes hybrides PV/Diesel [39].

- Les systèmes hybrides PV/Diesel série
- Les systèmes hybrides PV/Diesel commuté
- Les Systèmes hybrides PV/Diesel parallèle

III.5.1 La configuration série ou single master fixe

Dans cette configuration (voir figure III.5) , 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.

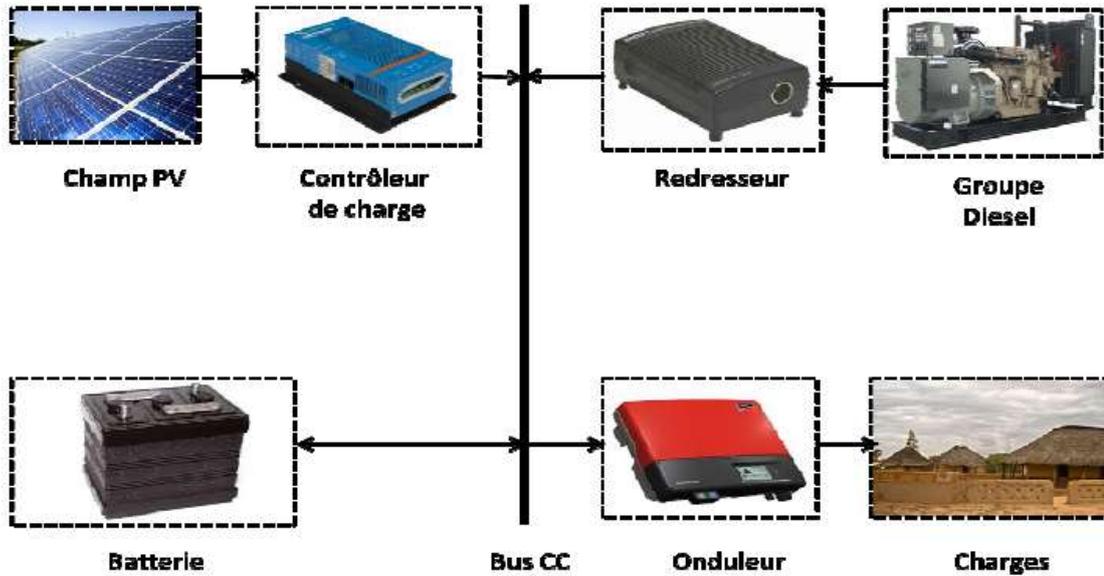


Figure III.5: Configuration PV/diesel série

Les points essentiels de cette architecture sont :

- elle est destinée aux petits systèmes incluant un générateur Diesel qui est rarement utilisé.
- le générateur diesel ainsi que les sources renouvelables sont connectés sur le bus DC de la batterie.
- l'onduleur autonome est uni- directionnel et contrôle la tension réseau, il permet en outre de convertir toute la puissance continue fournie par le champ photovoltaïque et le générateur Diesel en puissance alternative.
- lorsque l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'énergie stockée sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge, le générateur diesel est déconnecté.
- dans ce genre de systèmes, le rendement global est diminué à cause du transit d'une grande partie de l'énergie par les batteries. En effet le rendement des batteries chimiques est entre 70 et 80 % selon la technologie ce qui suppose que 20 à 30 % de l'énergie stockée est perdue [39].

III.5.1.1 Fonctionnement du système

Dans ce type de configuration, le générateur diesel est connecté au bus à courant continu. La connexion peut se faire directement (dans le cas d'un

générateur à courant continu) ou à travers un redresseur. Le générateur peut alimenter la charge à travers des convertisseurs électroniques ou charger la batterie. Lorsque l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'énergie stockée sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge, le groupe diesel est débrayé. La puissance en courant continu fournie par le champ PV et la batterie est convertie en courant alternatif par un onduleur. Il faut noter que dans la plupart de ce type de configurations, le transit d'une grande partie de l'énergie par la batterie diminue le rendement du système.

Le régime de fonctionnement du générateur dépend de la demande en énergie, de l'état de charge de la batterie et de la production du champ PV. Quand l'énergie produite par le champ est en excès, cela sert à charger la batterie, et celle-ci se décharge quand l'énergie produite n'est pas suffisante. Le contrôleur solaire prévient la surcharge et la décharge de la batterie[21].

III.5.1.2 Les avantages de cette configuration est

- la puissance du générateur diesel peut être optimale lorsqu'il approvisionne la charge et lorsque de plus il charge la batterie.
- le système électrique est simplifié par 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.

III.5.1.3 Les inconvénients de cette configuration sont

- 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.

III.5.2 La configuration PV/diesel commutée ou single master changeant

Cette configuration (figure III.6) est très fréquemment utilisée malgré ses limitations opérationnelles.

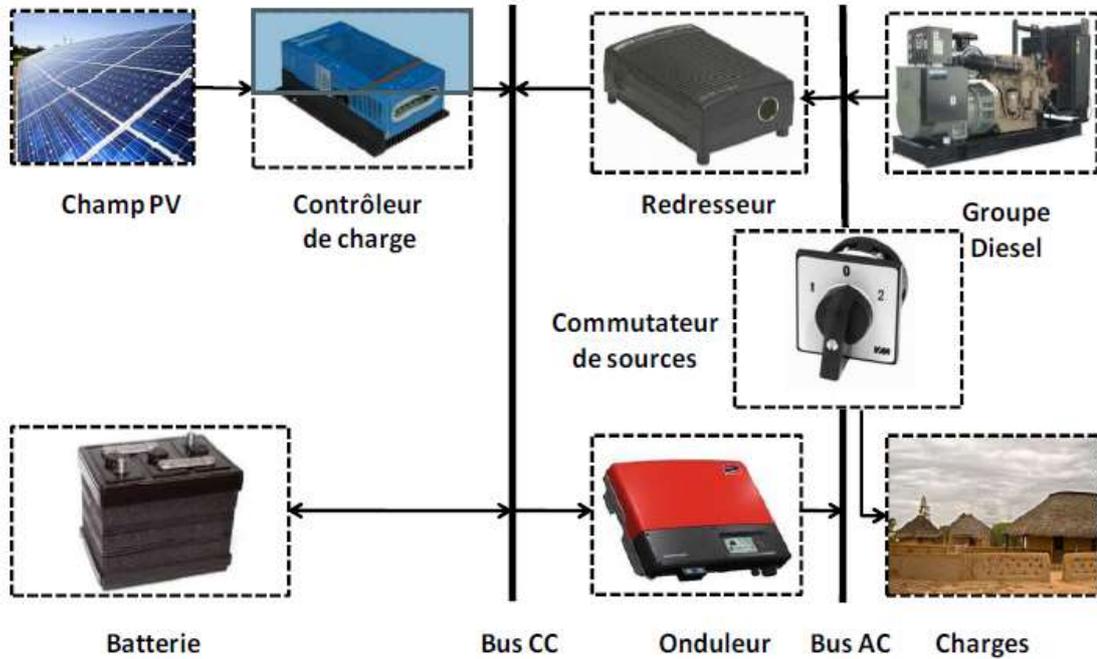


Figure III.6: Configuration commutée

Les points essentiels de cette configuration sont :

- le générateur diesel est connecté sur le bus AC, ce qui est plus efficace que la configuration série lorsque la contribution en diesel est importante dans le mix énergétique.
- la tension est contrôlée par l'onduleur batterie ou par le générateur diesel quand il est en opération.
- comme dans le cas précédent, le générateur diesel est arrêté, lorsque la demande est faible et peut être satisfaite par le photovoltaïque et la batterie. La complexité du système implique l'utilisation d'un contrôle automatique à la place de la commande manuelle.

III.5.2.1 Fonctionnement du système

Dans ce type de configuration, le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque et la batterie via l'onduleur, mais le fonctionnement en parallèle est toujours impossible [39]. La

batterie peut être chargée par le champ PV et le diesel par l'intermédiaire d'un redresseur.

Il n'y a pas des pertes de conversion significatives liées à la production du générateur diesel (en comparaison par rapport à la configuration série). En principe, la puissance produite par le générateur diesel est supérieure à la demande de la charge et l'excès est utilisé pour charger la batterie.

III.5.2.2 Les avantages de cette configuration sont

- le générateur diesel peut fournir l'énergie produite directement à la charge, ce qui augmente le rendement du système et diminue la consommation de carburant.
- l'avantage principal de cette configuration par rapport à la configuration série réside dans l'élimination de la conversion de l'énergie fournie par le générateur d'où l'élimination des pertes supplémentaires de conversion.
- la charge peut être alimentée soit par le générateur diesel, soit par l'onduleur alimenté par le photovoltaïque ou la batterie.

III.5.2.3 Ses inconvénients sont

- 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.
- la durée de la transition lors du changement de "master" cause généralement des variations de tension.

III.5.3 Configuration parallèle ou multi master

La configuration parallèle ou multi-master est représentée sur la figure III.7 suivante.

Les points essentiels de cette configuration sont :

- toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demandes mais également suppléer les pointes en combinant les sources ;

- le système parallèle peut alimenter une charge supérieure à la puissance nominale du générateur diesel ;
- dans cette architecture un stockage n'est pas indispensable. Cependant l'ajout d'un stockage à court terme servira à atténuer les fluctuations rapides de la ressource renouvelable et à réduire au minimum la réserve tournante.
- la tension du réseau peut être contrôlée soit par le groupe diesel ou le cas échéant par les batteries de stockage.

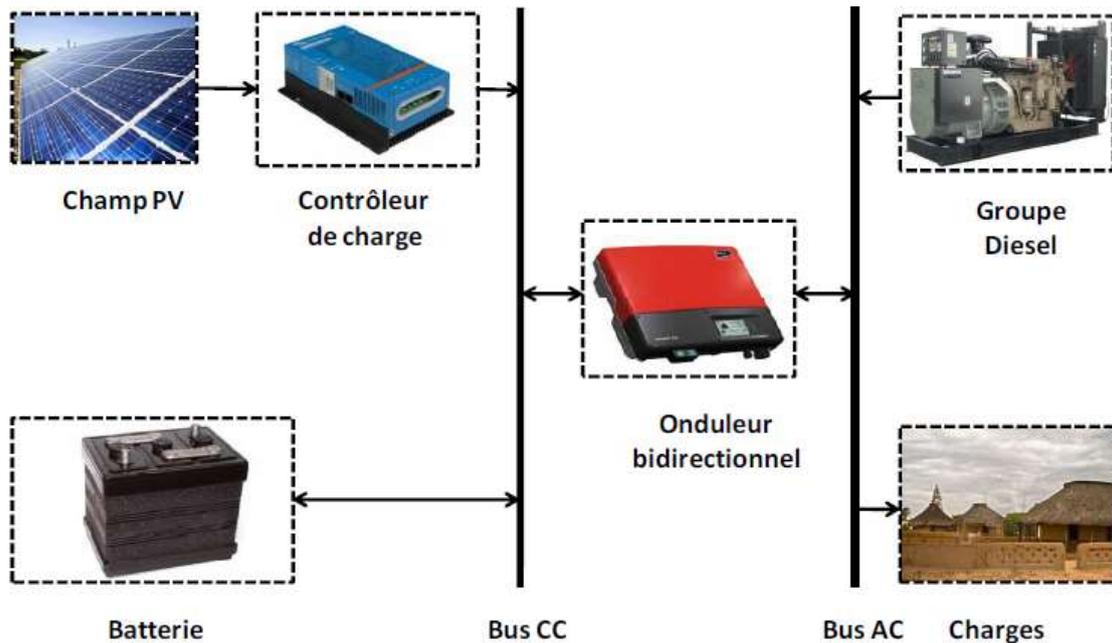


Figure III.7: Configuration PV/Diesel parallèle

III.5.3.1 Fonctionnement du système

Le générateur diesel est connecté au bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe au chargement de la batterie, soit comme onduleur quand la charge est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. La charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. On diminue le nombre des éléments dans le système en utilisant un seul convertisseur. 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.

La capacité du système est deux fois plus grande dans cette configuration. En outre, la possibilité de synchroniser l'onduleur avec le générateur diesel permet une meilleure flexibilité du système. Enfin, la puissance nominale du générateur diesel peut être diminuée, ce qui augmente la part de l'énergie directement utilisée et conduit donc à une augmentation du rendement du système[21].

III.5.3.2 Les avantages de ce système sont

- la possibilité de synchroniser l'onduleur avec le générateur diesel, ce qui permet une meilleure flexibilité du système et de plus, la puissance nominale du générateur diesel peut être diminuée ;
- le rendement du générateur diesel peut être augmenté ;
- les puissances nominales des différents éléments peuvent être diminuées par rapport aux puissances nominales dans les autres configurations, en alimentant toujours la même charge.
- l'association du générateur diesel et de l'onduleur permet l'alimentation d'une charge supérieure à la charge alimentée par chaque élément seul.

III.5.3.3 Les inconvénients de ce système sont

- un contrôle automatique est indispensable pour un bon fonctionnement du système ;
- les creux de tension et les fortes variations de fréquence entraîne souvent la déconnexion de l'onduleur du système ;
- la gestion du système n'est pas aisée pour une personne non qualifiée.

Dans la configuration hybride PV/Diesel parallèle on distingue généralement deux architectures (voir figure III.8) à savoir [41] .

- L'architecture « Multi-master » avec générateurs Diesels ;
- L'architecture « Multi-master » avec onduleurs.

L'architecture « Multi-master » avec générateurs Diesels est une architecture typique pour les grands systèmes avec plusieurs générateurs Diesel en parallèle couplés au

générateur photovoltaïque via un onduleur. Au moins un générateur Diesel produit et contrôle la tension du réseau.

L'architecture « Multi-master » avec onduleurs est constituée de plusieurs onduleurs couplés à un générateur Diesel. Ici l'augmentation du champ photovoltaïque est aisée car elle ne nécessite pas un arrêt total du système comme c'est le cas avec l'architecture précédente. Dans les deux architectures, un système de contrôle central peut être installé afin d'optimiser l'opération des générateurs diesel, (niveau de puissance, synchronisation, démarrage, arrêt). [46]

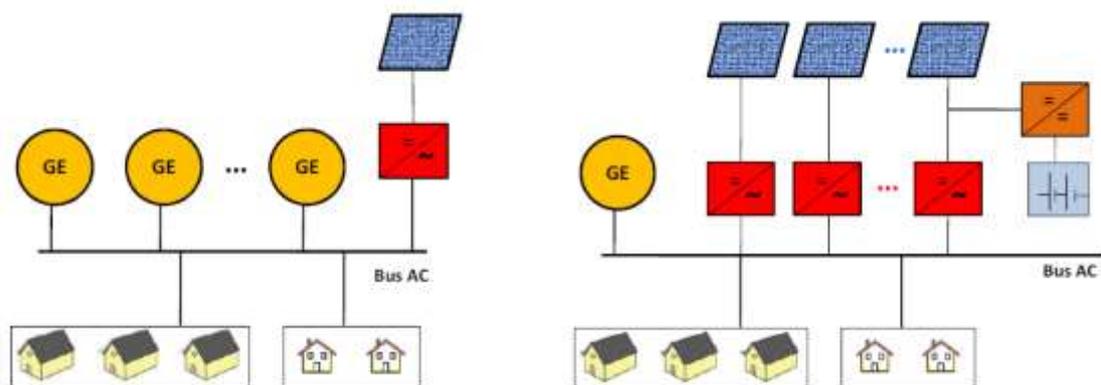


Figure III.8: Différentes architectures de la configuration PV/Diesel parallèle (a) architecture « Multi-master » avec générateurs Diesel, (b) architecture « multi-master » avec onduleurs

Il faut cependant souligner que la configuration multi master peut se faire avec plusieurs générateurs Diesels et plusieurs onduleurs [42].

III.6 LE CONCEPT « FLEXY ENERGY » (CFE)

III.6.1 Description du CFE

Le concept « Flexy Energy » est une approche originale développée par l'équipe du LESEE [34] et qui vise principalement à accroître l'accès aux services énergétiques en zones rurales et périurbaines en Afrique Subsaharienne à travers la production d'électricité décentralisée via des centrales hybrides PV/groupe électrogène (Diesel ou biocarburants selon les disponibilités).

Pour les réseaux autonomes qui constituent le point focal du concept « Flexy Energy », le prix de revient du kWh en exploitation est d'une grande importance pour la

durabilité des systèmes. Ces coûts concernent principalement le remplacement du parc de batteries dans le temps, et pour le groupe électrogène : le prix du carburant incluant son transport, la maintenance et la réparation du groupe électrogène, les coûts de gestion et d'approvisionnement des composants de rechange et les coûts de maintenance globale.

Par exemple au Mali, le coût moyen de production de l'électricité hors réseau s'élève à près de 0.47 USD/ kWh avec les sociétés de services décentralisées Korayé Kurumba et Yéleen Kura .

Le concept « Flexy Energy » revendique la possibilité de by-passer l'utilisation des batteries d'accumulateurs pour le stockage ou alors de minimiser la taille du stockage pour que le coût de son remplacement en soit diminué. Il est important de noter qu'il existe deux fonctions de stockage des batteries : il y a le stockage de production (qui nécessite un parc relativement important de batteries selon le nombre d'heures d'autonomie voulue) et le stockage de gestion de la centrale (nécessitant peu de batteries). C'est la seconde fonction de stockage qui est privilégiée dans ce concept. L'architecture générale des centrales « Flexy Energy » se présente tel que illustrée à la figure III.9 suivante .

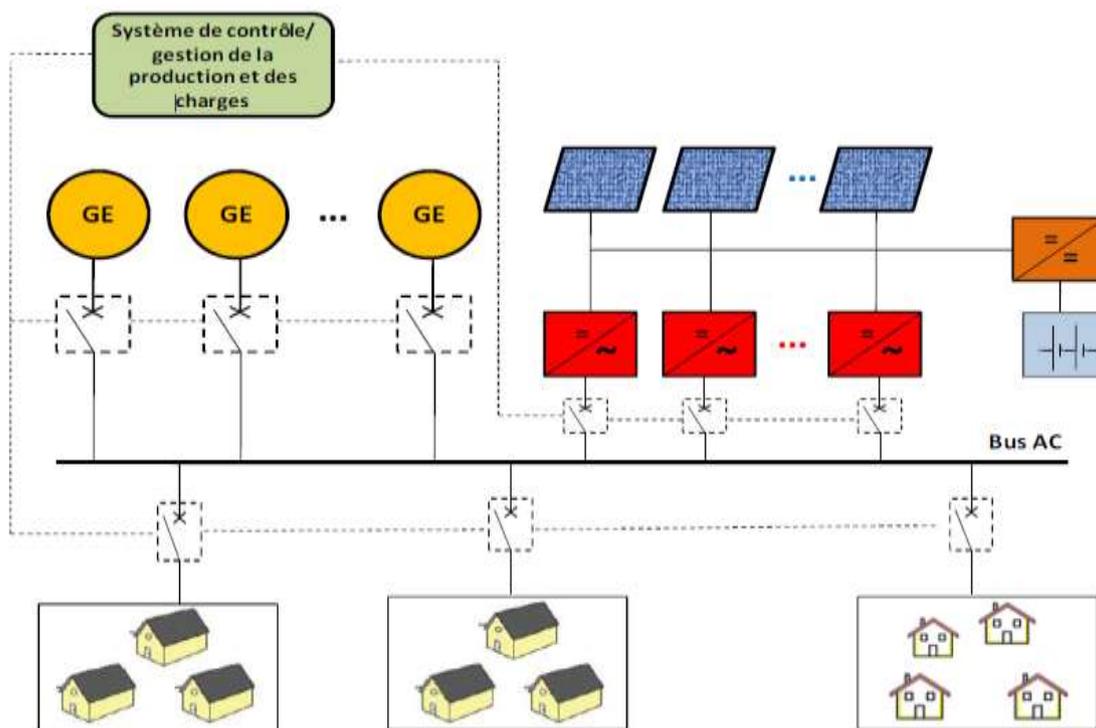


Figure III.9: Architecture général des centrales « Flexy Energy »

Il faut souligner que plusieurs études dans le domaine de l'énergie, sur la compétitivité et la croissance de l'économie ont montré que le développement socio-économique de la plupart des pays Africains est handicapé par le coût élevé des facteurs de production, notamment celui de l'électricité. Le concept « Flexy Energy » a ainsi pour ambition de réduire le coût de production du kWh au profit des populations les plus défavorisées d'Afrique subsaharienne (généralement celles des zones rurales et périurbaines) [42].

III.6.2 Les objectifs visés par le CFE

Les objectifs généraux du concept « Flexy Energy » peuvent se décliner comme suit :

- accroître l'accès aux services énergétiques en milieu rural et périurbain ;
- améliorer la sécurité de l'approvisionnement énergétique en zones périurbaines et rurales, à travers la diversification et la substitution progressive de « l'électricité fossile » ;
- accroître les revenus des plus pauvres à travers le développement d'activités génératrices de revenus par la mise à disposition de force motrice ;
- réduire les impacts environnementaux des services énergétiques en proposant des solutions propres et durables (diminution des Gaz à Effet de Serre...).

De façon spécifique, il s'agit dans le CFE de : démontrer la faisabilité technique,

Économique, sociale et environnementale de la production d'électricité décentralisée par des centrales hybrides PV/groupe électrogène (diesel ou biocarburant) en milieu rural et périurbain en Afrique Subsaharienne.

III.6.3 La pertinence technologique du CFE

La pertinence technologique proposée par le concept « Flexy Energy », réside dans la gestion intelligente des charges et dans l'optimisation du dimensionnement et de l'exploitation des moyens de production (PV / groupe électrogène) afin de répondre au plus près à la demande. Cependant si on minimise la capacité des batteries tel que préconisé dans le CFE, il n'y a que peu de capacité de stockage pour les heures à faible ensoleillement ; dans un tel système, l'énergie solaire doit être consommée en direct, et il convient de s'assurer que la consommation ne soit pas trop inférieure à la capacité de génération photovoltaïque pour éviter un retour sur le

groupe électrogène. Une option possible de gestion qui sera analysée dans le CFE concerne la mise à contribution de charges secondaires pilotables comme le pompage de l'eau ou un système de purification d'eau par exemple. En revanche, toute la consommation de nuit est générée par le(s) groupe (s) électrogène(s).

L'utilisation de biocarburant comme les huiles végétales en substitution au Diesel est un aspect du concept qui revêt plusieurs avantages. En effet l'utilisation d'huiles végétales brutes (HVB) locales, présentant des caractéristiques intéressantes et n'entrant pas en compétition alimentaire, comme substitut au diesel permet non seulement de maximiser le recours aux énergies renouvelables, mais aussi de minimiser le coût de production du kWh et ainsi accroître la valeur ajoutée en milieu rural, enfin sécuriser l'approvisionnement en carburant et surtout créer des emplois au niveau local (production et transformation des graines pour la production de ces huiles) [42].

III.7 CONCLUSION

Durant ce chapitre, nous avons exposé les différents composants d'un système hybride et leurs fonctionnements. Le processus de design associé à ces systèmes est toutefois un problème relativement complexe puisqu'il implique la nécessité de considérer à la fois le dimensionnement, les stratégies d'opération et la fiabilité du système qui est l'un des paramètres les plus importants de la sûreté de fonctionnement, car tout système photovoltaïque hybride qui fonctionne dans un milieu hostile tel que le désert est susceptible de tomber en panne. Des composants le constituant peuvent être en dysfonctionnement ou en panne, ce qui influe sur le reste de l'installation et à la fourniture de l'énergie électrique.

**CONCEPTION ET ETUDE
ÉCONOMIQUE
DES SYSTÈMES HYBRIDES**

IV.1 Introduction

Les systèmes hybrides photovoltaïques /groupes électrogènes offrent un réel avantage pour l'électrification rurale décentralisée. Ils permettent de réduire les coûts par rapport à des solutions à source d'énergie unique. La conception des systèmes hybrides et leurs optimisations technico-économique est sensiblement plus complexe, elle exige une analyse précise de plusieurs paramètres et facteurs pouvant influencer le rendement et la compétitivité du système.

Le dimensionnement, ayant une incidence sur le prix, la qualité et la pérennité d'un système photovoltaïque hybride en site isolé constitue donc une étape cruciale lors de la mise en place d'un système réel de production d'énergie électrique hybride. Il dépend:

- De l'ensoleillement du site au cours de l'année;
- De l'énergie requise pour chaque charge à alimenter;
- Du rendement énergétique de l'ensemble des composants y compris le stockage;
- Des coûts d'installation des équipements;
- Des frais d'exploitation et de maintenance;
- Des coûts de remplacement des différents équipements.

IV.2 Dimensionnement et méthodes d'optimisation

L'optimisation des systèmes hybrides à énergies renouvelables, s'intéresse au processus de sélection d'une meilleure configuration des composants et de leur dimensionnement, compte tenu de l'efficacité, de la fiabilité et du rapport coût/efficacité du système. L'application d'une stratégie d'évaluation appropriée est indispensable.

IV.2.1 Etude technique des systèmes PV hybrides

Les performances d'un système énergétique hybride, le rendement et la durée de vie, sont influencés en partie par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants, l'architecture etc. Une évaluation des besoins énergétiques doit être effectuée sur le :

- Dimensionnement des modules photovoltaïques;
- Dimensionnement du stockage;
- Dimensionnement du système d'appoint;

➤ Dimensionnement des convertisseurs.

À cet égard, des outils logiciels sont largement utilisés pour la simulation, l'optimisation et le dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides. Les outils logiciels couramment utilisés sont: Homer, Hybrid2, HYBRIDE, iHOGA, PVSYS, SOMES, RAPSIM, SOLSIM, Insel, PVDESIGN PRO, RSHAP, ORIENTE et d'autres. Cependant Homer (hybrid optimisation model for electric renewables) à ce jour l'outil le plus utilisé pour l'analyse technico-économique reste la validation des systèmes énergétiques hybrides.

De ce fait, nous avons choisi d'utiliser le programme PVSYS pour étudier la parité technique d'un système hybride

IV.2.1.1 Présentation de Logiciels PVSYS

PV SYST est un logiciel de dimensionnement de panneaux solaires permettant d'obtenir diverse informations telles que la production d'énergie, l'irradiation et le coût de l'installation, la surface nécessaire, ou la production annuelle d'énergie. Un mode avancé permet d'obtenir beaucoup plus d'informations pour une étude très complète.

Le logiciel comprend principalement deux modes de fonctionnement. Le premier est une application de pré dimensionnement assez simple à prendre en main et accessible au néophyte. Le deuxième permet une étude beaucoup plus approfondie et prend en compte beaucoup plus de paramètres. De plus il se base sur du matériel concret pour ses calculs, contrairement au premier mode qui effectue ses calculs pour un cas très général.

Pour chacun des deux modes, le principe est le même : on donne la localisation géographique de l'installation, puis on entre les données concernant l'installation. Vient ensuite une partie résultats où l'on choisit les données qui nous intéressent.

Ce logiciel est donc accessible aux confirmés comme au néophyte. Dans cette documentation ne seront pas traitées les parties « installation de pompage » et les aspects financiers. [43]

IV.3 Profil de charge d'une maison

L'estimation de l'énergie journalière consommée par les différents équipements électroménagers et l'éclairage sont présents sur le tableau suivant :

Tableau IV.1: profil de charge d'une maison

les outils	Nombre	puissance	Utilisation	Energy
les lampes	8	18Wh/lamp	5h/jour	720Wh/jour
TV / bande vidéo / PC	2	75Wh/app	3h/jour	450Wh/jour
réfrigérateur / congélateur	1		600Wh/jour	600Wh/jour
Lave-vaisselle Laveuse	1		1200Wh/jour	1200Wh/jour
L'énergie quotidienne totale				2970Wh/jour

IV.4 La simulation d'un système autonome avec PVSYSY

➤ projet : site géographique : Ghardaïa Algérie

Situation : latitude $32^{\circ} 23' N$ longitude $3^{\circ} 46' E$

la figure IV.1 suivant montre le plan du capteur d'orientation : inclinaison 32°

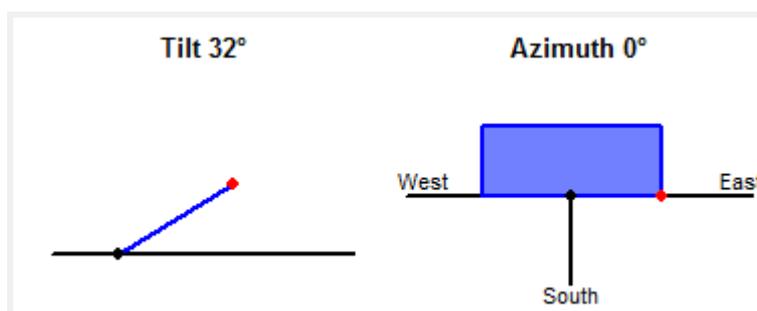


Figure IV.1 : Le plan du capteur d'orientation

1) générateur PV

Le type de panneau solaire PV

Manufacture isofoton

Nombre de modules

PV = 4 , (1 module en série et 8 en parallèle)

Caractéristiques de fonctionnement de module

U 29 V, I 32 A

Superficie totale du générateur PV

10.3m²

2) Batterie

type

Modèle volta 6SB100

Les caractéristiques de batterie

Voltage : 24, capacité nominale : 300 Ah

nombre d'unités (2 en série. 3 en parallèle)

3) régulateur

Type

Fabricant Isofoton modèle isoltel 90

seuils de gestion de la batterie

Charge 27.4/ 35.2 V décharge 21.8 / 24.0 V

4) générateur (groupe électrogène)

modèle 3KW générateur de secours

puissance 3KW

Les besoins de l'utilisateur, la consommation constante sur l'année

Moyenne 1.8KWh/jour

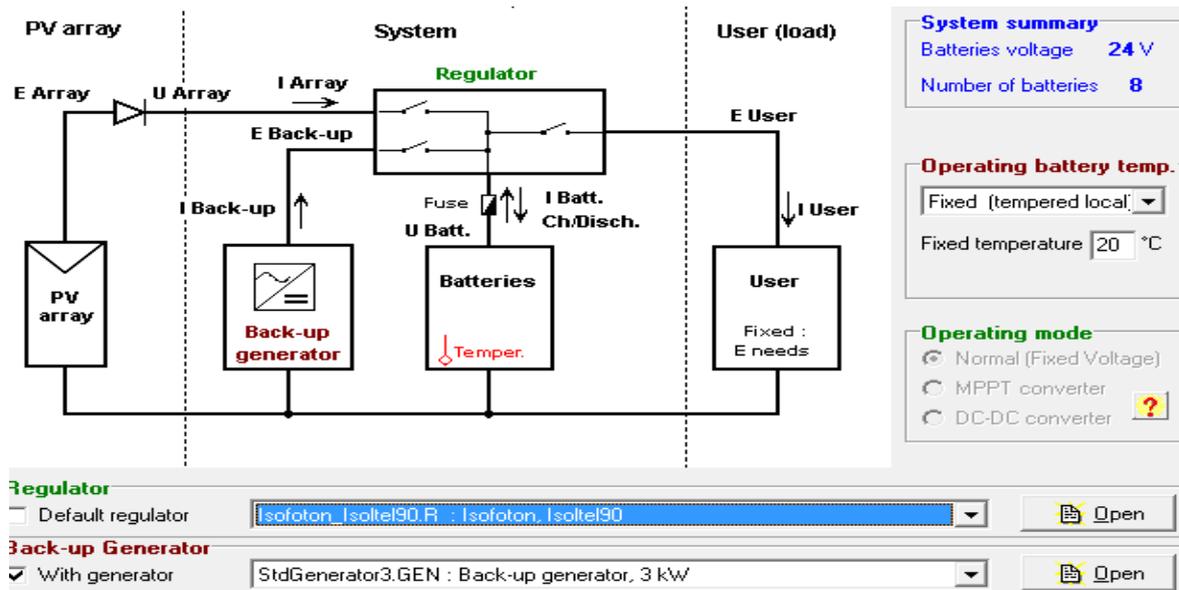


Figure IV.2: Résumé du système proposé par notre PVSYS

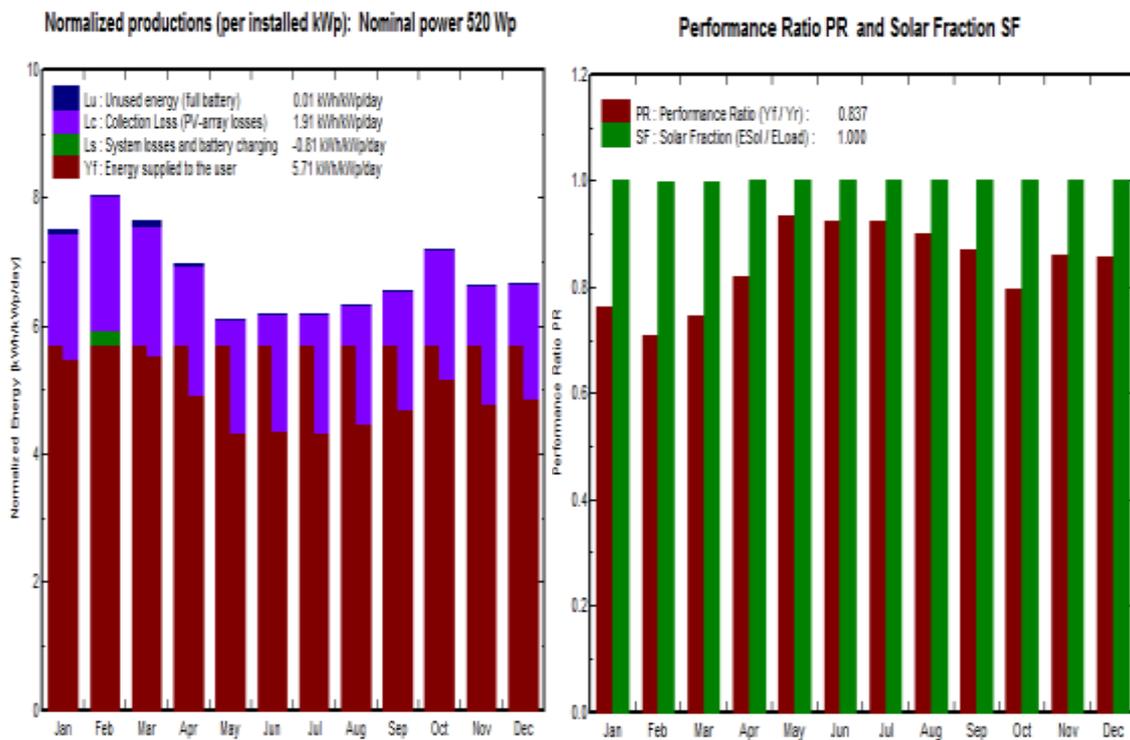


Figure IV.3: Résultat de La simulation d'indice de performance de l'énergie solaire et la rupture

Nous donnons les résultats de l'énergie consommée estimation mensuelle dans le tableau suivant Tableau IV.3

Tableau IV.2: énergie consommée estimation mensuelle

les mois	irradiation globale horizontale KWh/m ²	l'énergie solaire disponible KWh/m ²	énergie inutilisée (batterie pleine) perte KWh	l'énergie fournie à l'utilisateur KWh	besoin en énergie de l'utilisateur (charge) KWh	fraction solaire (utilisé / charge) KWh
Janvier	164.0	227.5	0.975	92.08	92.7	0.912
Février	177.0	220.1	0.000	93.5	83.16	1.000
Mars	217	231.0	1.385	92.03	92.7	1.000
Avril	223	202.0	0.025	100.2	89.10	0.825
Mai	225	182.2	0.029	92.09	92.7	0.727
Juin	234	178.2	0.033	89.10	89.10	0.704
Juillet	236	184.8	0.209	92.09	92.7	0.751
Août	219	190.0	0.046	92.09	92.7	0.741
Septembre	193	191.4	0.028	89.13	89.10	0.733
Octobre	187	217.4	0.000	92.09	92.7	0.917
Novembre	148	194.2	0.008	89.12	89.10	0.825
Décembre	142	201.4	0.005	92.09	92.7	0.823
L'année	2365.0	2421.1	2.744	1084.19	1084.05	0.829

À partir de résultats de simulation (tableaux IV.2 , les deux figures) on note

- L'énergie solaire disponible par le système , être plus grande en hiver les mois de Décembre, Janvier et Février et Mars par rapport à l'aspect pratique de l'été pour être beaucoup moins et ce est en raison de revenir panneaux solaire PV en été et ensoleillé et il y avait de nombreux usages dans ce mois
- Les énergie besoin de l'utilisateur (charge) et l'énergie qui fournier à l'utilisateur on presque même a l'environ de 90 kWh dans le mois dans tout l'année
- la performance du système hybride en a presque a égale 837 a la performance de la fraction solaire (utilisé / charge) 1000

Le Schéma de perte sur toute l'année résumé dans la figure IV.4.

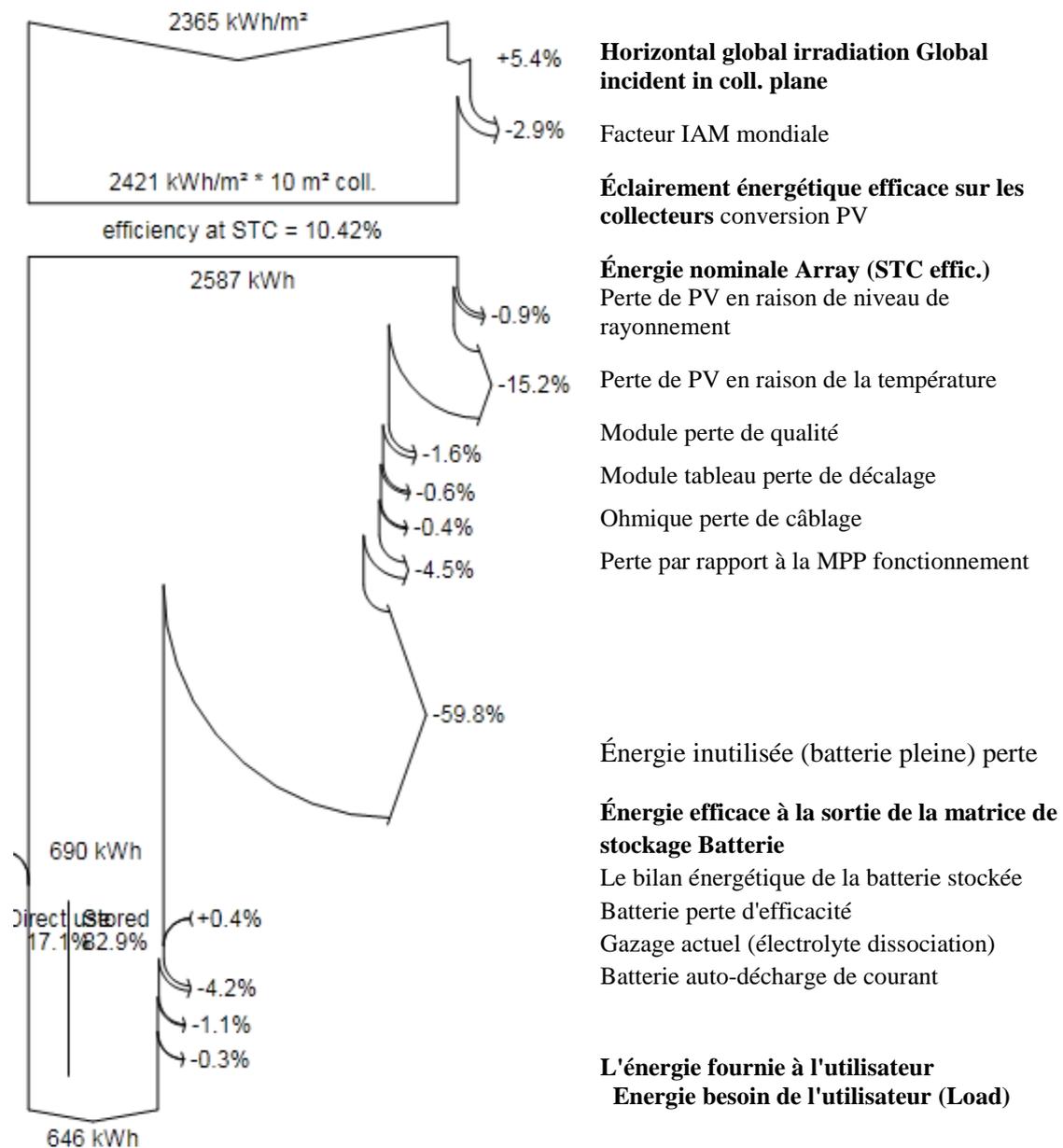


Figure IV.4: Le Schéma de perte sur toute l'année

IV.5 Etude économique des systèmes PV hybrides

La base de la plupart des décisions d'engineering est économique. Concevoir et construire un dispositif ou un système qui fonctionne correctement, est seulement une partie de la tâche de l'ingénieur. Le dispositif ou le système doit, en outre, être économique, ce qui signifie que l'investissement doit montrer une rémunération

appropriée. Le modèle économique est fondé sur l'utilisation conventionnelle des coûts économiques de cycle de vie.

Les calculs du coût du système hybride prennent en compte des coûts tels que le capital de l'investissement et l'intérêt, l'amortissement, les frais de fonctionnement, l'entretien et le carburant. Toutes ces estimations des coûts sont détaillées dans ce qui suit.

IV.5.1 Coût total d'investissement

Comme détaillé ci-dessous, l'analyse des flux de trésorerie produit des chiffres détaillés année par année pour les dépenses et les revenus du projet. Les dépenses sont séparées dans les catégories suivantes:

- Les coûts d'installation des équipements;
- Les frais d'exploitation et de maintenance;
- Les coûts de remplacement des différents équipements

La valeur du capital installé est le coût d'investissement initial pour un système PV, y compris les coûts des équipements, les frais d'importation ainsi que les droits de douane, les frais d'installation et peut-être le coût d'extension d'un réseau de distribution du système d'alimentation. Le modèle prend en considération les charges supplémentaires du système à long terme 'CCAP,CHAR', afin de prévoir tout les coûts d'investissement qui sont propres à l'utilisateur. Par conséquent, le coût en capital du système installé. CCAP,TOT est donné par[48][49].

$$\mathbf{CCAP,TOT = CCAP,PV + CCAP, BT + CCAP, GE + CCAP,CONV + CCAP,CHAR} \\ \mathbf{+ CCAP,INST + CCAP,ATR}$$

$$\mathbf{CCAP,INST = CINST,PV + CINST,BT + CINST,GE + CINST,CONV}$$

$$\mathbf{CCAP,CONV = CCAP,OND + CCAP,REG + CCAP,RED}$$

$$\mathbf{CCAP,ATR = CINP + CATR}$$

IV.5.2 Coût annuel

Il s'agit des frais d'entretien réguliers et du coût du carburant (Groupe électrogène) au fil des ans. Les données réelles de coûts d'entretien et de carburant annuel sur les systèmes installés sont différentes pour chaque emplacement. Par conséquent, le coût annuel du système, $C_{ANN,TOT}$ est donné par [48][49].

$$C_{ANN, TOT} = C_{ANN,PV} + C_{ANN,BT} + C_{ANN,GE} + C_{ANN,CRBC} + C_{ANN,CONV} + C_{ANN,STS} + C_{ANN,ATR}$$

Où

$$C_{ANN,CRP} = CRP/L * \text{consommation de carburant} * Hr \text{ groupe}$$

$$C_{ANN,CONV} = C_{ANN,OND} + C_{ANN,REG} + C_{ANN,RED}$$

IV.5.3 Le coût de remplacement

Les coûts de remplacement des équipements sont légèrement plus complexes à calculer, car ils ne sont pas vraiment annuels. Les principaux composants du système doivent être remplacés au cours de la durée de vie du système. Pour convertir les coûts de remplacement annuellement en coût annuel de remplacement (CREPL), l'équation est donnée par [44,45]:

$$C_{REPL,GE} = C_{GE} * (PWF, i, n)$$

$$C_{REPL,BT} = C_{BT} * (PWF, i, n)$$

$$C_{REPL,CONV} = (COND + CRED + REG) * (PWF, i, n)$$

$$C_{REPL,ATR} = C_{ATR} * (PWF, i, n)$$

Et le facteur de la valeur actualisée (PWF) est donné par :

$$PWF = F * \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right]$$

$$\text{avec } i = \frac{i_f - f}{1 + f}$$

IV.5.4 Valeur actuelle des coûts annualisés et la valeur récupérer

Le facteur série de valeur actualisée (SPWF) traduit la valeur d'une série de revient uniforme 'C' dans la valeur actuelle. La valeur actuelle de la série peut être trouvée en appliquant la PWF à chacun des montants C, donnée par[48].[108,109]:

$$C_{ANN,PW} = (C_{ANN,TOT} * (SPWF,i, n))$$

$$SPWF = A * \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$$

$$C_{REC,PW} = (C_{ANN,TOT} * (SPWF,i, n))$$

IV.5.5 Coûts du cycle de vie (CCV)

La méthodologie utilisée pour définir la CCV est un processus en plusieurs étapes, tel que présenté ci-dessus. Ce procédé nécessite des ensembles de données provenant du système en service et la mise au point d'un outil de base de données sophistiquée pour l'analyse des données. CCV détermine quels systèmes d'alimentation peuvent être concurrentiels avec d'autres options énergétiques [44,45].

$$CCV = CCAP,TOT + C_{ANN,PW} + CREPL,PW + CREC,PW$$

IV.5.6 Valeurs actuelles nettes (VAN)

Dans le modèle économique, la valeur actuelle nette du projet est déterminé en additionnant le coût annuel, le coût de remplacement et les dépenses en capital initiales, telle que donnée par :

$$VAN = (-CCAP,TOT) + C_{ANN,PW} + CREP,PW$$

IV.5.7 Coûts moyens actualisés de l'énergie (COE)

Un autre calcul moyen actualisé concerne le coût de l'énergie, le COE. Le coût moyen actualisé de l'énergie totale est donnée par [44,45].

$$\text{COE} = \frac{\text{CCV}}{\text{Ep}_{\text{PROD}} * n}$$

IV.5.8 Présentation de l'outil de simulation adopté

La simulation et l'optimisation économique d'un système hybride est effectuée sur le logiciel HOMER (hybrid optimization model for electric renewables) développé par NREL (national renewable energy laboratory) aux Etats-Unis [46]. Il simplifie la tâche d'évaluer les conceptions des différents systèmes d'alimentation électrique, hors-réseau et reliés au réseau, pour une variété d'applications. Il permet d'analyser et de combiner diverses sources d'énergie afin d'arriver à afficher une configuration optimale.

IV.6 Evaluation des données climatiques

Les conditions climatiques déterminent la disponibilité et l'ampleur de l'énergie solaire à un site donné. Les diverses études entreprises jusqu'à présent sur le potentiel énergétique solaire en Algérie font apparaître un potentiel considérable pour l'utilisation et l'exploitation de cette forme d'énergie [47]. En effet, l'Algérie avec plus de deux millions de km² de superficie, reçoit l'équivalent de 300 milliards de Tep par an en énergie solaire. En termes d'insolation, l'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KWh sur la quasi-totalité du territoire national, la durée d'insolation quant à elle dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara.

IV.6.1 Les zones climatiques de l'Algérie

On peut définir pour l'Algérie 4 zones climatiques (figure IV.5), une zone au Nord et 3 zones au Sud. Chaque zone est décrite ci-dessous [48].

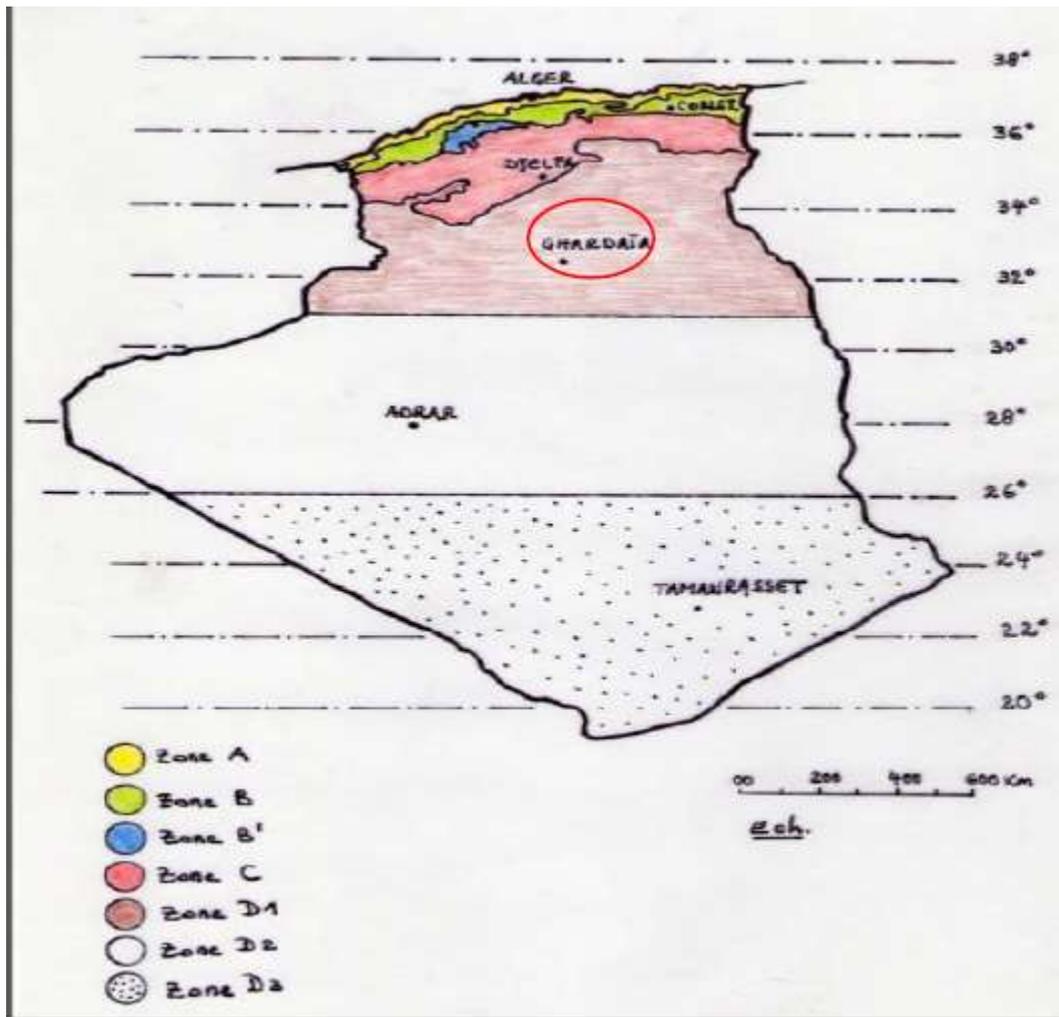


Figure IV.5: Les zones climatiques de l'Algérie.

- Zone A: Elle comprend le littoral et une partie du versant Nord des chaînes côtières (climat méditerranéen maritime).
- Zone B: Elle comprend la plaine et les vallées comprises entre les chaînes côtières et l'Atlas Tellien, autre que celle de Chlef (climat méditerranéen continental).
- Zone B': C'est une sous-zone de la zone B. Elle comprend la vallée de Chlef, comprise entre la chaîne de l'Ouarsenis et les montagnes du Dahra et des Braz.
- Zone C: Elle comprend les hauts plateaux entre l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien, avec des altitudes supérieures à 500 m (climat méditerranéen de montagne).
- Zone D1: Elle comprend le Sahara au-delà de l'Atlas Saharien jusqu'à la latitude 31°.
- Zone D2 : Elle comprend le Sahara au-delà de la latitude 31° jusqu'à la latitude 26°.

- Zone D3 : Elle comprend le Sahara au-delà de la latitude 26° jusqu'aux frontières Sud.

Pour créer une base de référence pour notre étude nous avons choisi d'adopter les données de l'unité de recherche appliquée aux énergies renouvelables (URAER) de Ghardaïa.

IV.6.2 Présentation du site d'étude

Pour notre étude, une localisation géographique est considérée : la ville de Ghardaïa qui est située dans le centre de la partie nord du Sahara algérien, est à 600 km au sud d'Alger. Les coordonnées géographiques du site de collecte de données sont les suivantes: $32^{\circ} 23'$ de latitude nord, $3^{\circ} 46'$ de longitude est et 467m d'altitude.



Figure IV.6: Emplacement géographique du site d'étude.

Le climat de Ghardaïa, zone D1, est semi-aride et désertique. C'est un endroit idéal pour l'utilisation de l'énergie solaire. Les données météorologiques (rayonnement solaire et température ambiante) dans l'ensemble de l'année 2012 ont été relevées à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER).

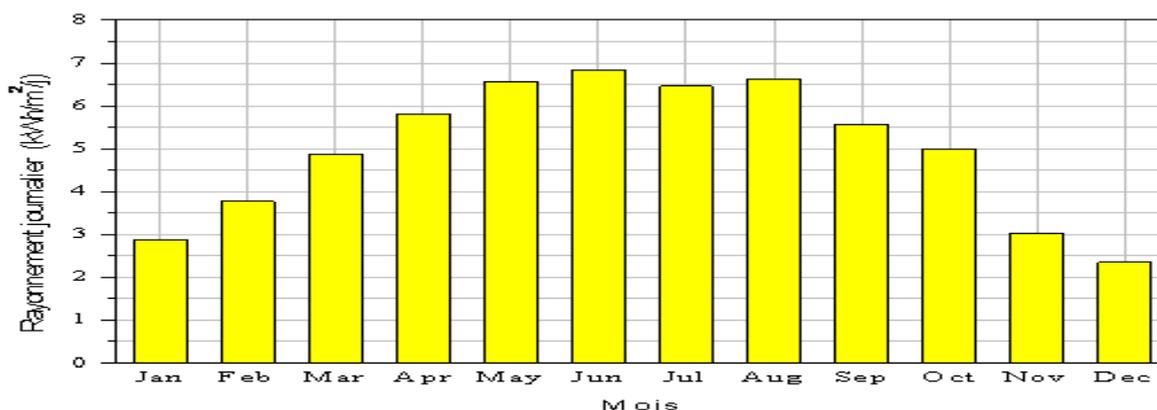


Figure IV.7: Rayonnement solaire mensuel moyen pour le site de Ghardaïa

A travers la figure IV.4, l'irradiation solaire moyenne journalière dans la région de Ghardaïa est estimée entre $2.35\text{kWh/m}^2/\text{j}$ et $6.86\text{kWh/m}^2/\text{j}$ avec un rayonnement solaire annuel moyen estimé à $4.98\text{kWh/m}^2/\text{j}$. Ce potentiel est assez important et il est pratiquement exploitable durant toute l'année.

Les performances des modules photovoltaïques sont directement corrélées aux données climatiques qu'est en principe l'irradiation solaire. Pour un profil de charge donné, la taille du système augmente quand la ressource climatique est faible.

La température moyenne est une variable climatique ayant un impact significatif sur le comportement des équipements. L'analyse de cette donnée s'avère capitale. On constate sur la figure IV.7 que les températures hivernales varient entre 7°C et 21°C , du plus froid au plus chaud de la journée. Elles grimpent à 35°C au mois de mai pour atteindre une moyenne de 40°C en juillet et août. Le mercure peut monter jusqu'à 45°C voire au-delà durant les vagues de chaleur.

IV.7. Simulation du système hybride adopté

L'étude économique est effectuée sur le logiciel HOMER, elle nous permet de comparer les contraintes financières et techniques relatives entre les systèmes hybride (PV / diesel) avec le système classique (groupe électrogène diesel) seul.

Le logiciel HOMER (hybrid optimization model for electric renewables) développé par NREL (national renewable energy laboratory, simplifie la tâche d'évaluer les conceptions des différents systèmes d'alimentation électrique, hors-réseau et reliés au réseau, pour une variété d'applications. Il permet d'analyser et de combiner divers sources d'énergie afin d'arriver à afficher une configuration optimale, différents cas de configurations ont

été évalués afin de déterminer selon un certain nombre de critères techniques, quelles sont les applications réellement envisageables pour ce type de système dans ce cas diverse opérations de transformation d'énergie ont lieu du moment que diverse sources contribuent a la génération d'énergie et sa conversion en énergie électrique.

Pour simuler une installation donnée, il faut définir tous les éléments de cette dernière, en utilisant les composants définis dans la bibliothèque du logiciel (groupe électrogène , PV, les batteries, , combustibles, biomasse...) par la commande Add/Remove. Si un composant donné ne figure pas dans cette bibliothèque, On peut aussi modifier les caractéristiques d'un composant déjà existant dans la bibliothèque. Les potentiels renouvelables (éolien, solaire, biomasse...) sont introduis soit manuellement, soit importés via internet ou d'un fichier texte. Les charges sont définies par leur nature (CA ou CC) et leur distribution horaire. [MGST]

Les différents composants du système photovoltaïque hybride sont introduits dans le logiciel HOMER avec les options de disponibilité technologique, le coût des composants et la disponibilité des ressources.

Nous présentons sur la figure IV.8 le diagramme relatif au programme HOMER, du Système hybride adopté.

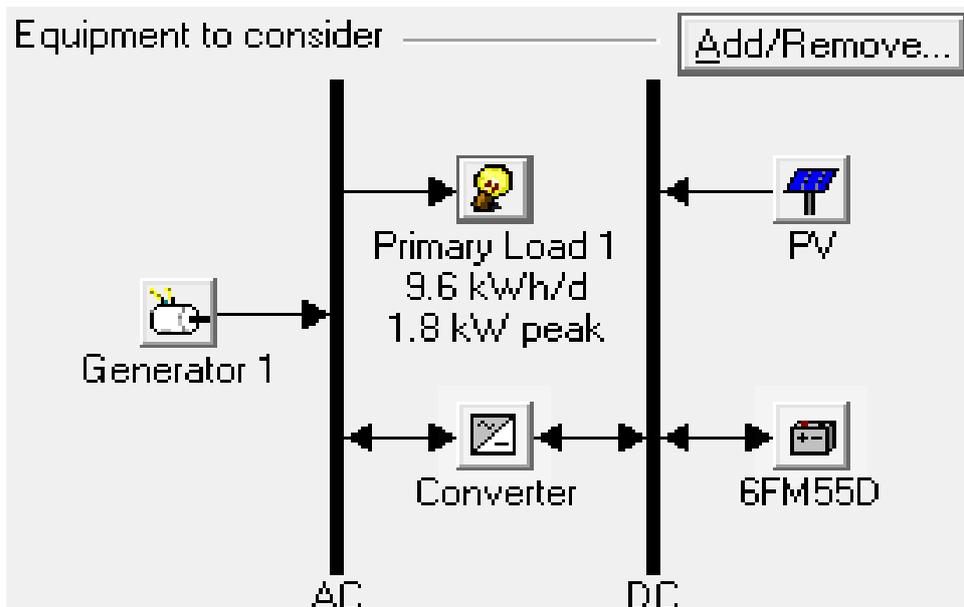


Figure IV.8: Configuration du Système Hybride étudié

Tableau IV.3: L'énergie produite annuellement

Production	kWh/yr	%
Photovoltaïque	7.048	76
Groupe électrogène	2.169	24
Total	9.217	100

Les systèmes de production participent suivant les fractions décrites dans le tableau et qui montrent une participation importante des sources renouvelables qui atteignent 76%.

Tableau IV.4 : consommée d'énergie annuelle

Charge	Consommation (kWh /an)	%
Charge CA	3,508	100
Total	3,508	100

La puissance moyenne mensuelle produite par les sources du SEH est illustrée dans la figure IV.9

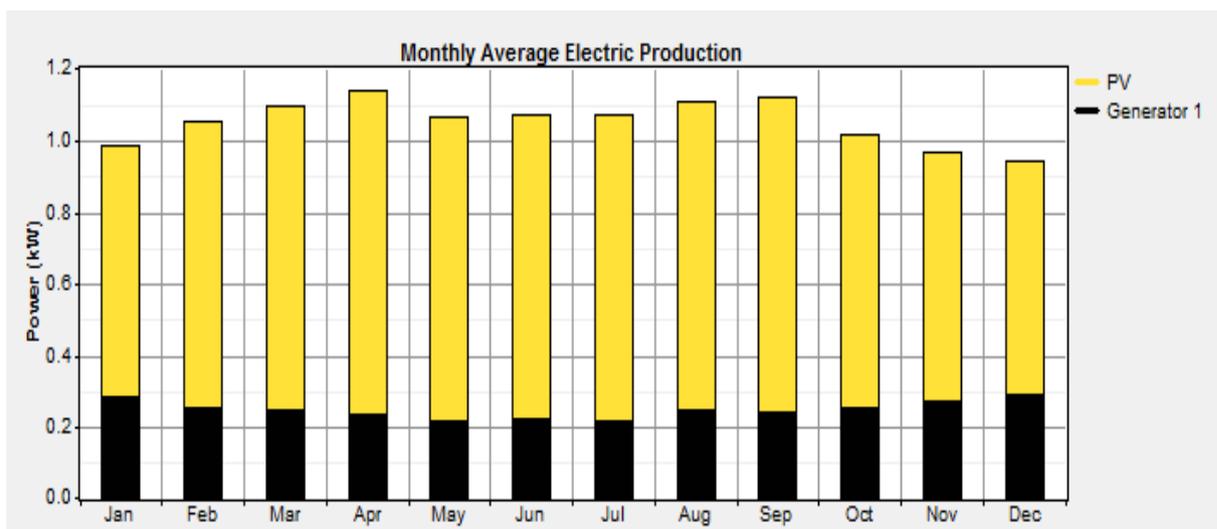


Figure IV.9: Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source

On remarque que presque deux tiers (76 %) des besoins énergétique du site sont fournis par les générateurs utilisant les ENR. Le reste (un tiers) est assuré par la source d'énergie conventionnelle (diesel). Cette fraction (76 %) est satisfaisante, en vue des ressources renouvelables disponibles relativement faibles, avec les puissances considérées du PV, et de la capacité de stockage dans la simulation. D'autre part, l'augmentation de ces puissances engendre des coûts prohibitifs du système.

A noter aussi que la fraction de 76 % est une moyenne annuelle, qui n'est pas constante sur toute l'année, elle est liée à la variabilité des ressources en Enr. Les mois les plus mieux ensoleillé correspondent à une production importante par les Enr avec une faible production par le DG et inversement.

IV.7.1 Le Générateur Photovoltaïque

Les paramètres techniques et économiques des composants du Générateur adopté sont représentés sur le tableau suivant.

Tableau IV.5: Paramètres des composants du Générateur .

Photovoltaïque (ISOFOTON) IS 130S / 24	
Puissance de crêt d'un module	130Watt / 24 Volt
Nombre	4
Capitale	2500\$
Remplacement	2500\$
Coût d'opération et de maintenance	10\$/an

Les puissances journalières moyennes ainsi que les puissances mensuelles moyennes, pour chaque mois de l'année, sont représentées respectivement par les courbes de la figure- IV.10 et par la figure (IV.11)

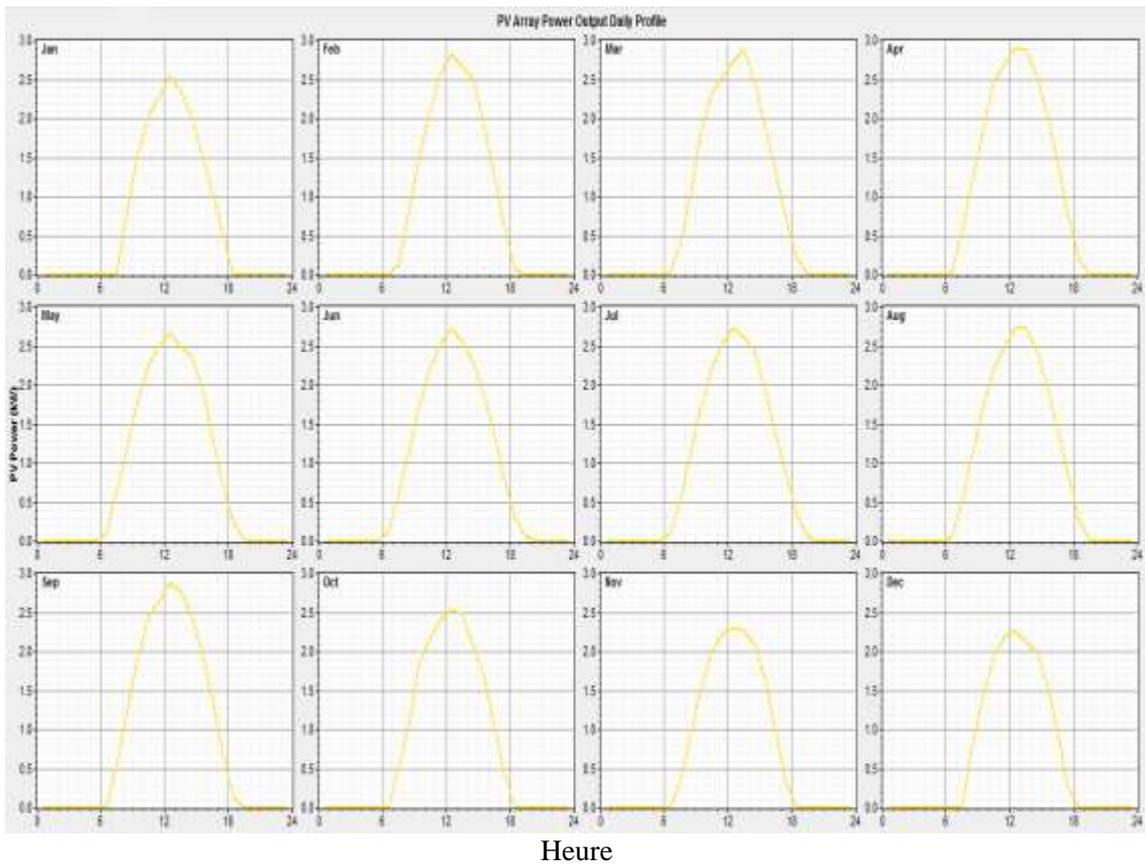


Figure IV.10: Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source

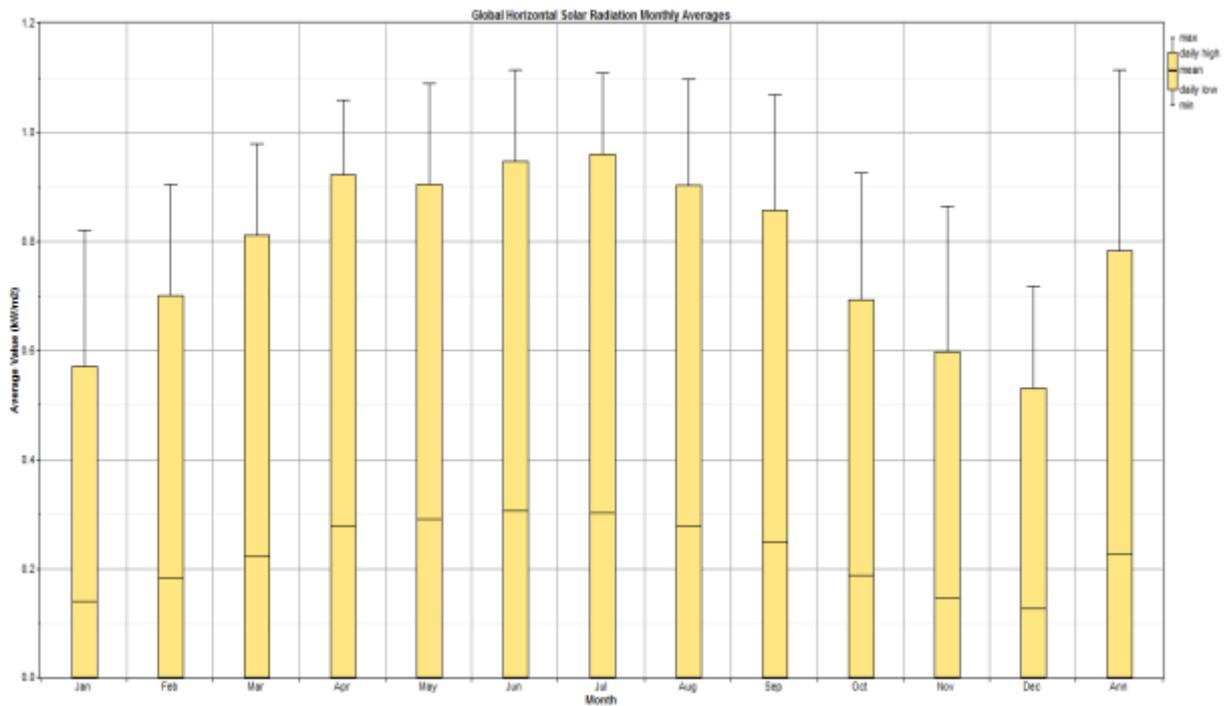


Figure IV.11: Représentation des puissances moyennes mensuelles du PV

Après l'analyse des résultats obtenus pour les des puissances moyennes journalières du PV, on remarque que la période de fonctionnement du PV est plus étroite durant les mois d'hiver, c'est environ entre 7h et 17h, soit 10 heures par jours (Novembre, Décembre et Janvier) et inversement pour la période d'été. La production par PV est nulle, ou très faible, aux périodes du pic de consommation électrique (entre 20 h et 22 h), ce qui nécessite soit le recours au autres générateurs, soit à l'énergie stockée, et ce selon la valeur du pic, ainsi que le classement de la journée dans l'année.

IV.7.2 Les Batteries (BERGAN ENERGY)

Les paramètres techniques et économiques des différents composantes du la batteries sont représentés sur le tableau suivant.

Tableau IV.6: Paramètres des composants du les batteries

Batteries (BERGAN ENERGY)	
Vb	12 V
Capacité	100 Ah
Nombre	6
Tension nominale	300Ah
Capitale	850\$
Remplacement	850\$
Coût d'opération et de maintenance	15\$/an

Pour analyser le fonctionnement journalier des batteries on utilise les courbes de l'état de charge moyenne journalière données par la figure IV.12 (en % de la capacité maximale).
Figure III.

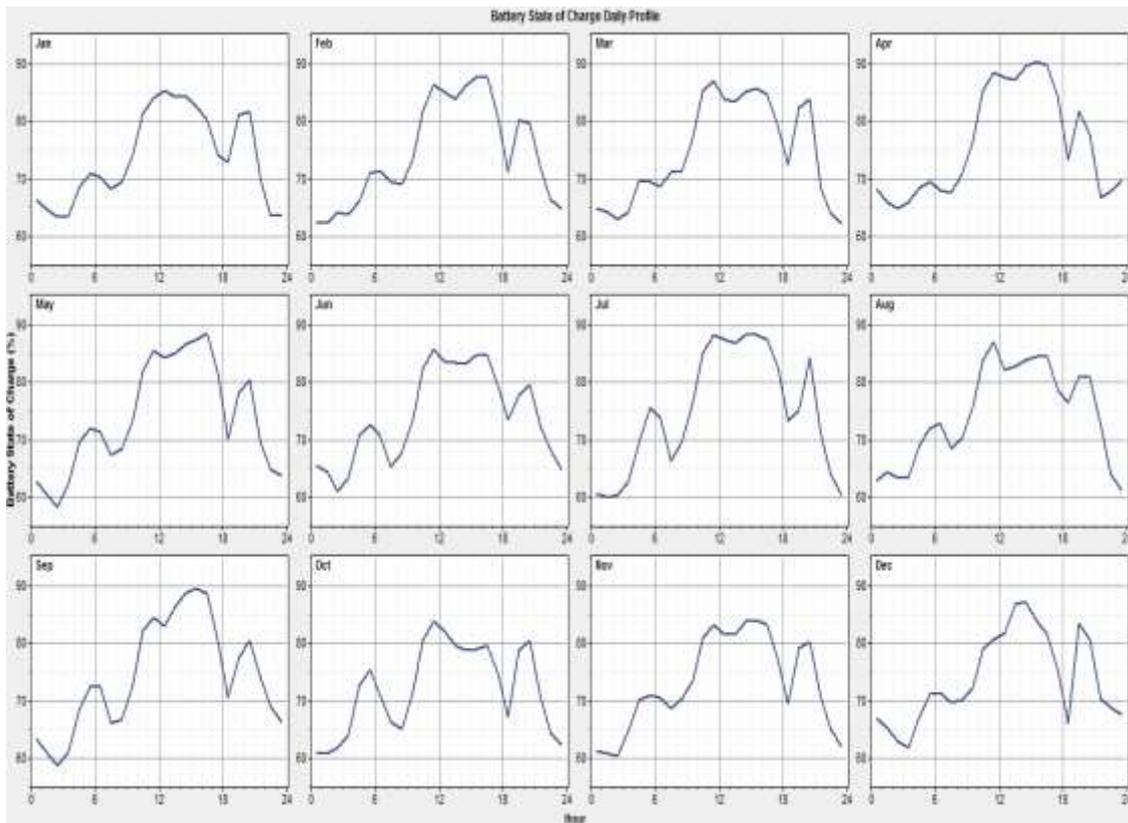


Figure IV.12: Etat de charge moyenne journalière des batteries

Le profil de la distribution journalière moyenne de l'état de charge est relativement semblable pour tous les mois, mais ce n'est pas avec les mêmes valeurs. L'état de charge journalière moyenne est caractérisée par un minimum à environ 7h du matin. Ce minimum se situe juste avant le premier pic de production du diesel (voir figure III-10) et après le pic de l'onduleur. Un état de charge minimal signifie que le système de stockage a fourni de l'énergie au bus CA. Pour cette période de la journée (7h du matin), les batteries fournissent le maximum d'énergie, elles servent comme un système d'appoint. La courbe d'état de charge des batteries est croissante entre l'heure du minimum 7h et 3h du matin, c'est la période de recharge.

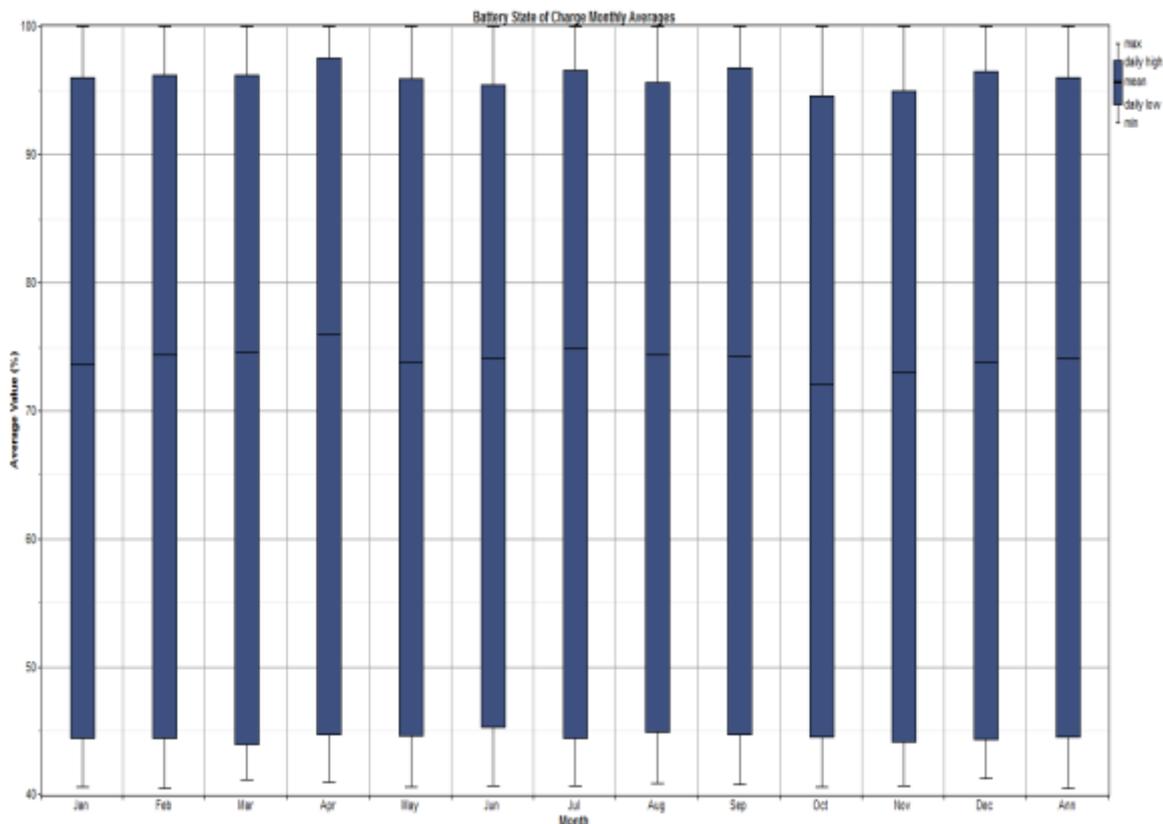


Figure IV.13: Etat de charge mensuelle des batteries (en%)

Les batteries d'un système hybride subissent un cyclage important avec des décharges Profondes plus ou moins importantes. Selon la durée de la décharge, on peut distinguer Trois cas :

L'effet d'un cyclage journalier dont le profil et l'amplitude dépendent de l'énergie fournie par les générateur PV, et celle consommée par l'utilisateur. Le cyclage journalier peut introduire des décharges très profondes d'une durée généralement courte.

L'état de charge moyen de la batterie peut atteindre un niveau critique suite à quelques Jours consécutifs d'ensoleillement exceptionnellement faible.

La variation de l'ensoleillement moyen en fonction de la période de l'année résulte en un cyclage saisonnier. Ce dernier peut parfois conduire à des périodes prolongées de charge basse de la batterie, quand les capteurs photovoltaïques n'arrivent pas à recharger complètement la batterie.

IV.7.3 Le Générateur Diesel

Le générateur diesel est appelé à fonctionner à n'importe quel moment de la journée et d'une manière optimisée, c'est-à-dire une possibilité de fonctionnement à pleine charge comme à charge partielle et ce selon les besoins du site. La mise en marche (ou à l'arrêt) est donc fonction de la demande, de la production des autres générateurs et de l'état de charge des batteries.

Les paramètres de fonctionnement sont donnés par le tableau- IV.7.

Tableau- IV.7 : Paramètres de fonctionnement du générateur diesel

Propriété	Valeur	Unité
Prix de diesel	0.14	\$/L
Prix de Transport de diesel	0.2	\$/L
Heures de fonctionnement	1816	h/an
Carburant utilisé annuellement	1145	L/an
Utilisation spécifique du carburant	0.404	L/kWh
Rendement électrique moyen	25.2	%

Et les paramètres techniques et économiques de différentes composantes d'un groupe électrogène sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau IV.8: Paramètres des composants d'un groupe électrogène

Groupe électrogène (GREENPOWER)	
Carburant	DIESEL
Fréquence	50/60 Hz
Tension nominale de sortie	230 V
Puissance	3kW
Nombre	1
Capitale	1250 \$
Remplacement	1250 \$
Coût d'opération et de maintenance	0.50 \$/h

Les puissances journalières moyennes délivrées, pour chaque mois de l'année, sont représentées par les courbes de la figure IV.14 :

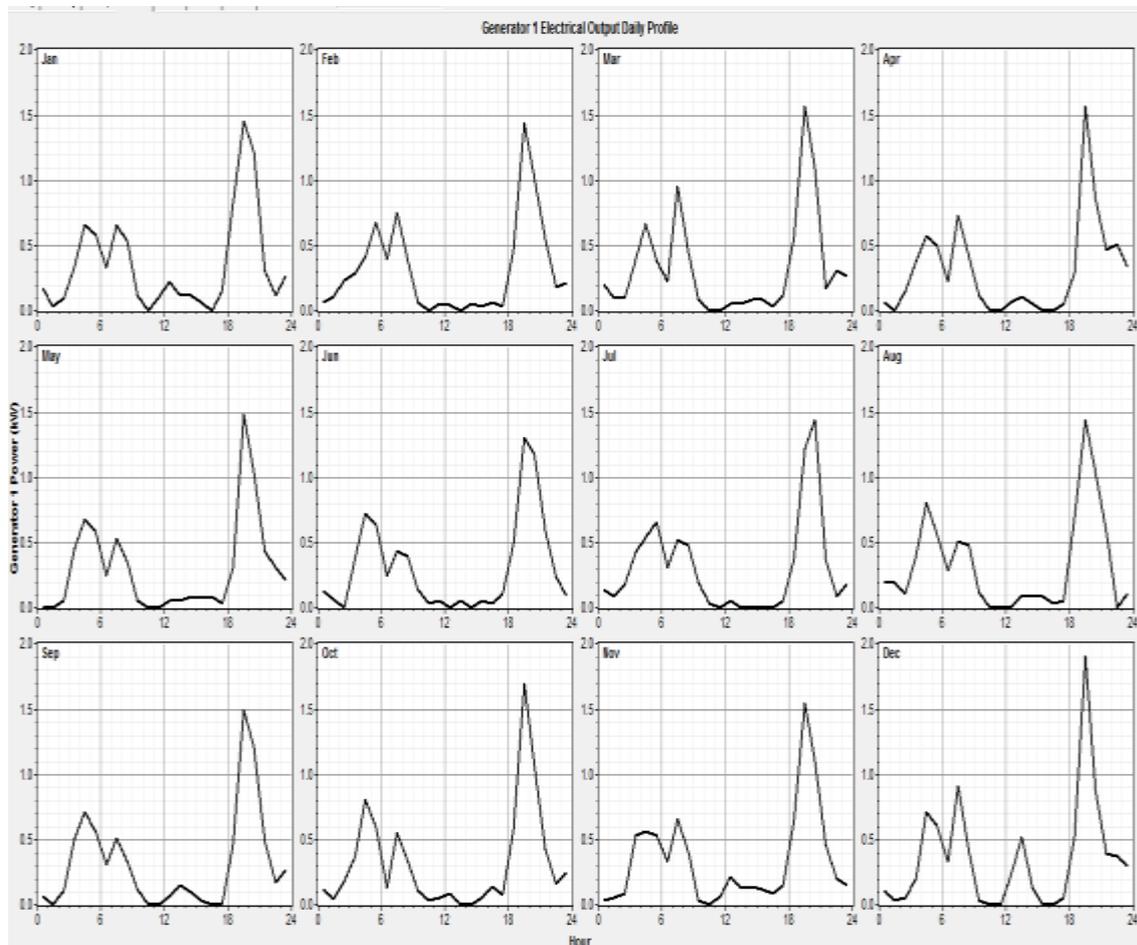


Figure IV.14: Puissances journalières moyennes délivrées par le diesel

A partir de ces courbes, on remarque que le profile des puissances journalières moyennes du DG sont semblables pour tous les mois (ils ont la même allure), mais à des valeurs différentes. Ils sont caractérisés par deux minimums (production faible ou nulle) et deux pics.

Le premier minimum, qui correspond à la période entre 3h et 5h du matin, représente une très faible production. Il est justifié par la faible charge électrique dans cette période (la nuit). Les batteries peuvent satisfaire la demande. La production du générateur PV est nulle à cette période de la journée.

Le deuxième minimum, durant la journée, est traduit par une demande moyenne (hors du pic) et par une production maximale par PV.

Le premier pic de production à environ 8h du matin, est due à :

- ✓ Une augmentation de la charge électrique,
- ✓ Une très faible production (ou nulle) du PV à cette période de la journée,
- ✓ L'état de charge des batteries est minimal.
- ✓ Le diesel est donc utilisé pour combler le manque et pour recharger les batteries.
- ✓ Le second pic à lieu environ 21h, ce pic est justifié du fait que :
- ✓ Cette période de la journée correspond à la charge électrique maximale (heure de pointe),
- ✓ La production du PV est nulle.

A noter aussi que les valeurs de ses deux pics sont différentes d'un mois à un autre, ils sont importants pour les mois à faible potentiel renouvelable, particulièrement l'irradiation solaire (Janvier et Décembre).

Le diagramme ci-dessous illustre Figure IV.15: la production journalière du Diesel durant toute l'année. La couleur noire représente, selon l'échelle à droite, les périodes de l'arrêt et/ou à très faible production, alors que la couleur rouge montre les deux pics. La production moyenne est représentée par la couleur verte. Les périodes d'arrêt, citées précédemment, sont bien illustrées dans ce diagramme (les zones en noire).

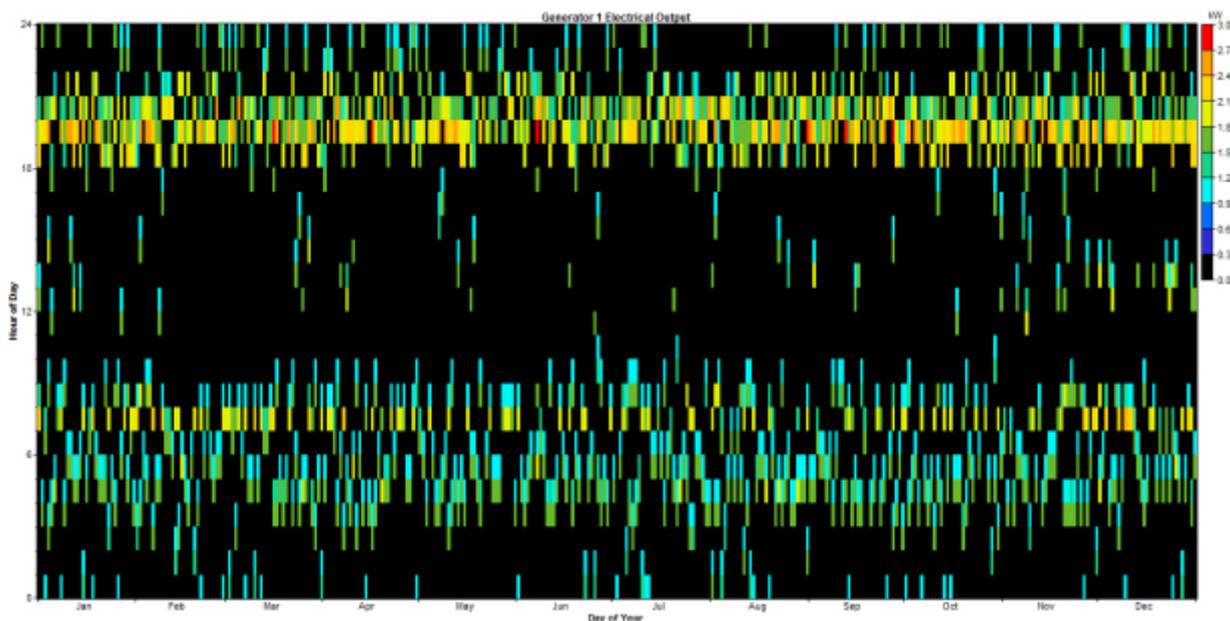


Figure IV.15: Production journalière moyenne du Diesel pour toute l'année

Pour mieux analyser la distribution de la production du diesel sur l'année, on utilise les puissances mensuelles moyennes développées représentées par la Figure IV.16

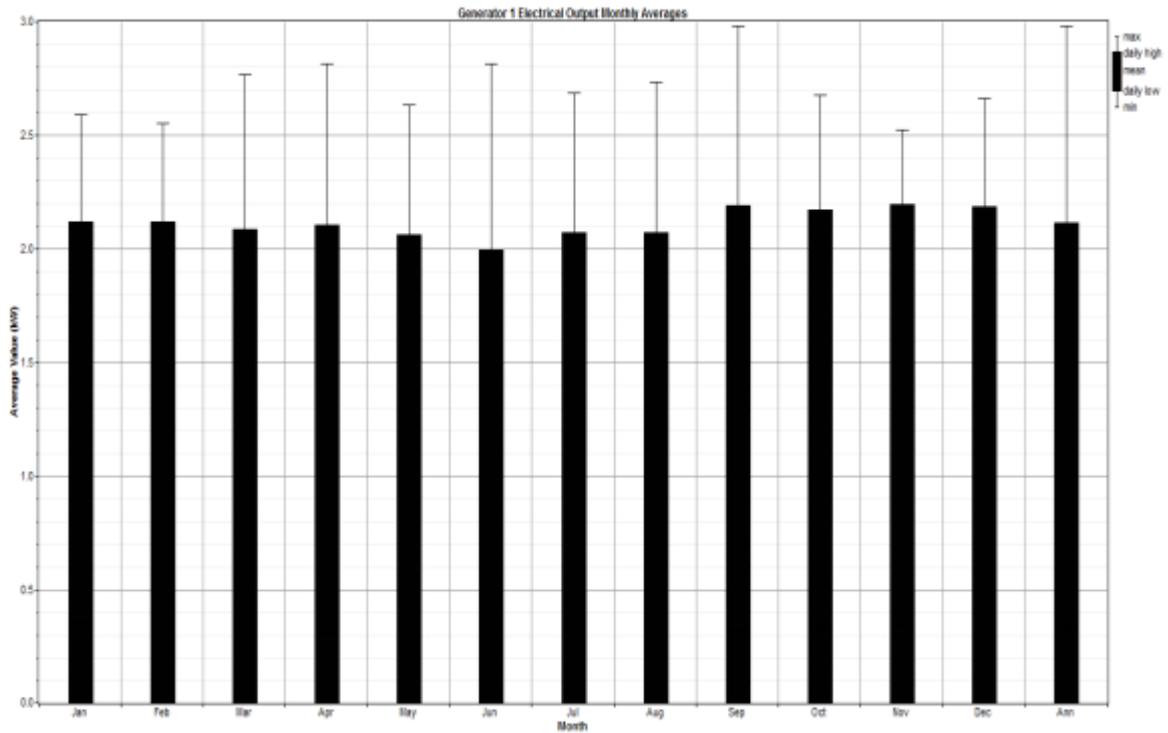


Figure IV.16: Représentation des puissances moyennes mensuelles du diesel

La production du générateur diesel est fonction des potentiels renouvelables. En effet elle est forte entre le mois de Septembre et le mois de novembre .et faible entre le mois de Mars et le mois d'juin.

IV.7.4 onduleur

Les paramètres techniques et économiques du l'onduleur représentés sur le tableau suivant.

Tableau IV.9: Paramètres des composants de l'onduleur

Onduleur	
Tension d'entrée	24 V
Tension de sortie / Forme	230 V / Sinusoïdal
Fréquence de sortie	50Hz
Puissance de sortie	2500W
Rendement	Jusqu'à 94%
Capitale	1400 \$
Remplacement	1400 \$
Coût d'opération et de maintenance	25 \$ /ans

La distribution journalière moyenne de la puissance délivrée par l'onduleur, pour chaque mois, est donnée par la Figure IV.17

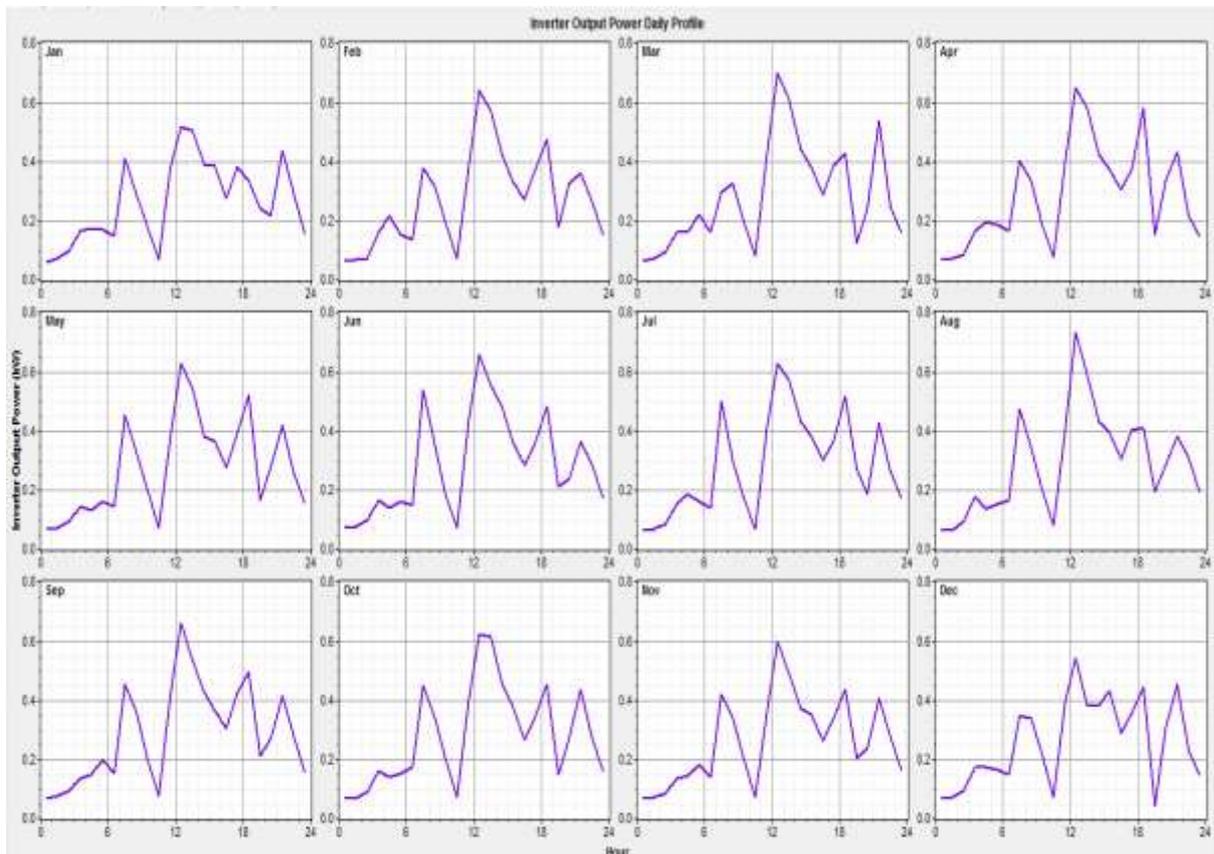


Figure IV.17: Distribution de la puissance moyenne journalière délivrée par l'onduleur

Les performances moyennes journalières simulées pour l'onduleur montrent que ces courbes de distribution de la puissance sont semblables pour tous les mois. Elles sont caractérisées par un pic entre minuit et 5h du matin, qui correspond à la période de décharge des batteries. La demande sur l'énergie stockée est maximale, ce qui justifie l'état de charge minimal des batteries à cette période. Un minimum de fonctionnement est constaté entre 6h et midi.

- **Homer**

Les calculs d'équilibre énergétique sont exécutés pour chaque configuration du système photovoltaïque hybride considérée. Les configurations obtenues sont sélectionnées en fonction de leur faisabilité, du coût d'installation. La rentabilité du fonctionnement est évaluée sur la vie du projet, estimée a priori à 25 ans. Les calculs du coût du SEH

prennent en compte des coûts tels que le capital et l'intérêt, l'amortissement, les frais de fonctionnement, l'entretien et le carburant.

HOMER produit des résultats que nous pouvons afficher sous forme de liste de configurations possible triés par coût du cycle de vie (Net present cost NPC). Il affiche également des résultats de simulation dans des tableaux et des graphiques.

IV.8 Résultats de simulation obtenus pour un système hybride

Nous montrons sur les Figures IV.18 les résultats obtenus pour un système hybride photovoltaïque avec un groupe électrogène Diesel.

	PV (kW)	Label (kW)	6FM55D	Conv. (kW)	Efficiency Measures	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
System 1	1	3	6	2	No	\$ 6,000	2,276	\$ 35,091	0.783	0.38	1,145	1,816
System 2		3	6	2	No	\$ 3,500	3,406	\$ 47,037	1.049	0.00	1,881	2,942

Figure IV.18: Variantes proposées par HOMER

A partir de résultat de la simulation, on remarque que :

- Le coût initial d'investissement - ① - sera plus cher pour le système hybride qui combine le PV avec le groupe électrogène 6.000 \$ par rapport à la combine groupe électrogène et les batteries seul d'avant l'hybridation

Mais on remarque dans - ② -

- le coût de fonctionnement par an du système hybride qui combine le PV et le groupe électrogène 2.276 \$/an est favorisé et économique à l'utilisation par rapport aux autres combinaisons 3.406 \$/an, Malgré son coût initial élevé estimé à 6000\$, on favorise le système hybride combinant le photovoltaïque avec un groupe électrogène; car on réduit le temps de fonctionnement du groupe électrogène, ainsi on économise du carburant et réduit la pollution.

• Dans - ④ - le système hybride, qui combine le photovoltaïque avec un groupe électrogène Diesel, est favorisé par rapport aux autres combinaisons, en raison du coût bas du kWh produit qui est estimé à 0.783 \$

• Dans - ③ - Le coût total du système hybride qui combine le photovoltaïque avec un groupe électrogène est abaissé avec une valeur de 35.091 \$ contre 47.037 qui combinent entre groupe électrogène et les batterie seules, en raison du coût élevé du prix du carburant , car PV on réduit le temps de fonctionnement du groupe électrogène dans le matin .

Dans -⑤-⑥- le groupe électrogène Diesel avec photovoltaïque consomme 1145 Litres de carburant, et l' heure de fonctionnement 1816 h/an moins par apport au système sans PV tandis que le système avec groupe électrogène est les batterie seules consomme 1881 L de période de fonctionnement 2,942 h/an , car les système avec PV on réduit le temps de fonctionnement du groupe électrogène et la consommation de diesel plus cher qui provoquent une pollution environnementale .

IV.8.1 Répartition des coûts de l'installation

Pour estimer le coût total du projet nous utilisons, pour chaque élément, les données suivantes :

- ✓ Le capital initial,
- ✓ Les coûts de fonctionnement et de maintenance,
- ✓ Le coût de remplacement,
- ✓ La durée de vie. [24], [25].

Tableau- IV.10 : Coûts de l'installation

Component	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	carburant (\$)	Récupération (\$)	Total (\$)
PV	2,500	780	128	0	-437	2,970
Générateur 1	1,250	1,550	11,658	2,047	-280	16,226
Batterie	850	11,836	192	0	-139	12,738

Convecteur	1,400	584	320	0	-109	2,195
Système	6,000	14,750	12,298	2,047	-965	34,130

Le coût total du projet est de 34130\$.

L'évaluation du coût total du projet est représentée dans la figure suivante Figure IV.19.

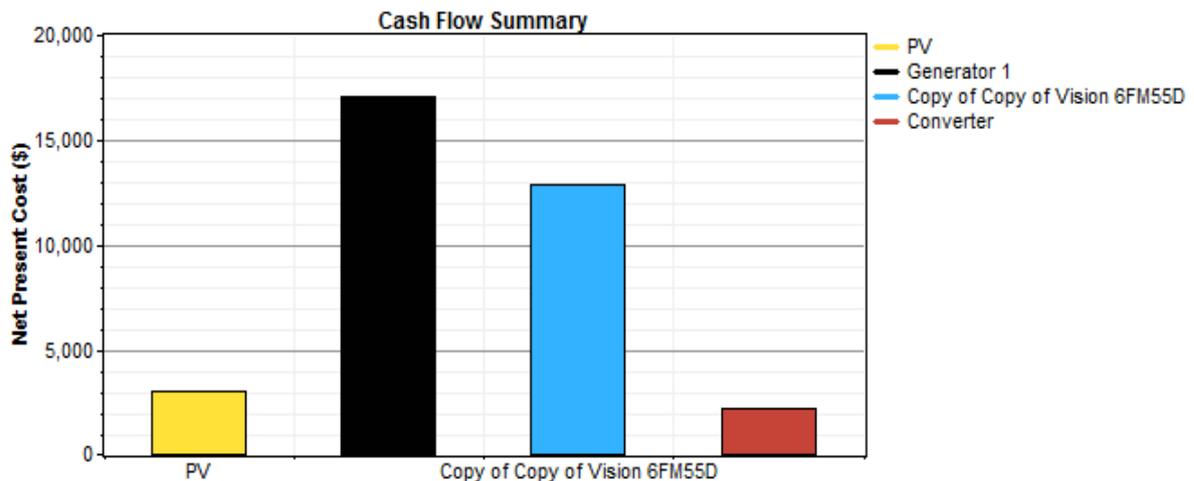


Figure IV.19: Répartition des coûts de l'installation

Le groupe électrogène diesel présente le coût le plus élevé (quatre fois celui du photovoltaïque), cela est dû au prix élevé du carburant et aux coûts d'entretien et de maintenance.

IV.8.2 Analyse environnementale

L'analyse environnementale du système hybride sur HOMER permet d'évaluer les émissions des polluants atmosphériques. Le tableau IV.11 résume la quantité totale d'émission des polluants dans les deux cas : avant et après l'utilisation des panneaux photovoltaïque.

Tableau IV.11: Emission des polluants atmosphériques

Avec panneau solaire photovoltaïque		Sans panneau solaire photovoltaïque (classique)	
Polluant	Émissions (kg/an)	Polluant	Émissions (kg/an)
Dioxyde de carbone	4.953	Dioxyde de carbone	3.012
Monoxyde de carbone	12.2	Monoxyde de carbone	7.43
Hydrocarbures imbrûlés	1.35	0.824	0.824
Matière particulaire	0.922	Matière particulaire	0.56
Dioxyde de soufre	9.95	Dioxyde de soufre	6.05
Oxydes d'azote	109	Oxydes d'azote	66.3

Les émissions de tous les gaz pour un système hybride sont beaucoup plus faibles par rapport à la seconde alternative (classique), en particulier les résultats obtenus mettent en évidence le rôle de l'utilisation des énergies renouvelables dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre (le taux de CO₂=4.953 kg/an pour un système utilisant seulement le groupe électrogène (système classique) et il est de 3.012 kg/an pour le système hybride étudié (PV/diesel/batteries).

IV.9 conclusion

Dans ce chapitre, une étude relative à la conception d'un système énergétique hybride à l'échelle d'une maison a été développée. Cette étude est répartie en quatre étapes principales, l'évaluation de la demande énergétique et de la ressource solaire, l'évaluation des options énergétiques et le choix d'un système.

Grâce à cette étude, une évaluation de l'impact de la technologie du groupe électrogène et la variation de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production et l'économie d'énergie d'un système énergétique hybride dans la région de Ghardaïa a été réalisée. On a constaté qu'une économie considérable de carburant peut être réalisée dans les installations hybrides photovoltaïques munies d'un dispositif de correction d'angle d'inclinaison et utilisant comme appoint un groupe électrogène fonctionnant au gaz butane. Pour ces régions où le prix du carburant augmente

progressivement avec l'isolement, une telle économie de carburant est capitale. L'alimentation d'une installation par plusieurs sources doit respecter une architecture de connexion.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire, concerne les systèmes de génération d'énergie électrique pour un fonctionnement autonome. Ces dispositifs semblent être amenés à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production, d'un meilleur respect de l'environnement.

Nous sommes arrivés à montrer l'intérêt que suscitent les énergies renouvelables dans les pays du Maghreb en Afrique du Nord. Ces énergies sont au terme de ces études rentables, puisque la région en question possède un potentiel très important en énergie. La concrétisation de la configuration choisie à travers une étude de cas pour un site en Algérie (Ghardaïa) permet l'implémentation et la validation d'applications spécifiques tenant compte des spécificités du site.

L'utilisation des énergies renouvelables comporte des avantages sur le plan financier et environnemental.

Elles innovent la conception des systèmes diminuant ainsi les coûts qui y sont reliés. L'architecture modulaire permet : de contribuer à un programme de mesures d'action précoce en matière de technologie,

- de contribuer à la croissance du marché photovoltaïque,
- une installation hybride qui représente une solution alternative efficace et qui permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre en réduisant l'utilisation de combustible fossile.
- d'atteindre un rendement maximal,
- une efficacité sur le plan énergétique.

L'utilisation de plusieurs sources d'énergie dans un SEH a une incidence profitable sur la production d'énergie, en termes de coût et de disponibilité, étant donné que le bilan « écologique » est supposé à priori favorable.

Les moyens de production tels que le photovoltaïque, etc. présentent des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes, non corrélées à l'évolution de la charge. Le but premier d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si

possible, de rendre maximale dans le bilan, la part d'énergie provenant des sources d'énergie renouvelable.

Les performances de générateur PV fluctuent avec les conditions climatiques.

Afin d'exploiter au maximum l'énergie solaire, l'adaptation des générateurs est nécessaire pour les faire fonctionner dans les conditions optimale. Le modèle de simulation développé peut être utilisé, non seulement pour analyser la performance d'un système hybride, mais aussi pour dimensionner le système le plus adaptable pour l'alimentation des différentes charges électriques pour n'importe quelle localité spécifiée, pourvu que les données météorologiques locales soient disponibles.

L'approche de modélisation sous HOMER a pour but de réduire les coûts de conception et les temps de mise sur le marché et de choisir la configuration optimale.

En résumé, on peut dire qu'avec une installation hybride on peut atteindre :

1) Objectif principal: alimenter les charges électriques

- Sans interruption
- Avec une bonne qualité de tension
- Au moindre coût

2) Objectif secondaire

- Maximiser l'utilisation des énergies renouvelables
- Minimiser la consommation en combustible fossile

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Abbou Hania , mémoire maserter Commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV , Soutenu le : 28/06/2014.
- [2] <http://www.kelwatt.fr/energie.php#> Devis électricité - gaz : 09 87 67 54 75 (Web Energie ; lundi-vendredi 8H30-21H ; samedi 9H-18H).
- [3] <https://www.calculo.fr/Eco-travaux/Les-sources-d-energies-fossiles>.
- [4] ZONGO Sibiri Judicaël Noël , Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Master d'ingénierie en énergie, 2iE, 2010 .
- [5] wikipedia energie solaire photovoltaïque.
- [6] <http://energie.wallonie.be/xml/doc-IDC-2822-.html>.
- [7] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems », Ph.D, P.e U.S merchant Marine Academy, Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [8] Belhadj Mohammed «Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome» université de Bechar ,2008 .
- [9] Chafika ZIDANI ;; thèse , Conception et modélisation des systèmes photothermiques. Applications aux systèmes photothermiques alimentés par fibres optiques ,, En Décembre 2012, Univ. Tlemcen.
- [10] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy, « Le pompage photovoltaïque : Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », Université d'Ottawa, 1998.
- [11] <https://fr.wikipedia.org>.
- [12] Pollution Probe, «L'abc des technologies de l'énergie renouvelable »,2003.
- [13] michel villosz ,livre énergie solaire photovoltaïque (anne labouret . michel villosz) 2e édition.
- [14] D. SEMMAR «Application Directe de l'Énergie Géothermique en Algérie» bulletin des énergies renouvelables N°5 Juin 2004, CDER.

[15] S. OUALI «Les sources Thermales en Algérie» bulletin des énergies renouvelables N°13 Juin 2008, CDER.

[16] Wahiba Bendaïkha «La climatisation géothermique: une solution adaptée à l'Algérie» bulletin des énergies renouvelables N°17 2010, CDER.

[17] Lilia AICHE-HAMANE «Les perspectives de la production de l'Hydrogène par voie Eolienne» bulletin des énergies renouvelables N°13 Juin 2008, CDER.

[18] SAHEB KOUSSA «Production d'électricité par un générateur éolien» bulletin des énergies renouvelables N°13 Juin 2008, CDER.

[19] Majda Amina AZIZA «Bioénergie et Biocarburants» bulletin des énergies renouvelables N°14 Décembre 2008, CDER.

[20] L. AMROUCHE, S. IGOUD «Pourquoi s'intéresser au Biogaz ? » bulletin des énergies renouvelables N°7 Juin 2005, CDER.

[21] Brahim Abdallah Brahim mémoire << Etude des différentes configurations des systèmes d'énergie hybrides PV/Diesel et de leurs impacts sur le coût de production de l'électricité >>.

[22] sylvain Brigand livre < Installation solaires photovoltaïque >.

[23] Energie solaire photovoltaïque.doc pdf / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.

[24] T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement, manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie,(AFME).

[25] C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger ».2006.

[26] A. Guen, « contribution à l'étude des système de télécommunications mobiles Alimentés par énergie solaire », thèse de magister, Université de Tlemcen, février 1992.

[27] anne labouret . michel villoz , livre énergie solaire photovoltaïque (anne labouret . michel villoz) 2e édition .

[28] Jean-Marc Cottier, ing. EPFZ, 1200 Genève , LIVRE Centrales photovoltaïques Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l'usage des bureaux d'ingénieurs 1996, 252 pages.

[29] Maouedj Rachid, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et Bouzareah» Université de Tlemcen, 2005.

[30] <http://www.ecologie-shop.com/conseils/installation-photovoltaique-pour-site-isole-batterie-solaire-pour-stocker-l-energie-16>.

[31] H. gabler , g. bopp , f. haugwitz , liu hong , li zhiming , h. müller , a. steinhüser. 'pv village power supply systems in china - results from a technical monitoring campaign' asia europe clean energy (solar) advisory (2006).

[32] M. Ashari and C. V. Nayar, "An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic-diesel battery hybrid power system," Sol. Energy 66(1), pp. 1–9 (1999).

[34]GARENI INDUSTRIEL ET NET4UN : Système de production d'énergie hybrides solaire PV/Diesel. Constructeur de groupe électrogènes diesel, Intégrateur de systèmes solaires PV.

[35]J. G. McGowan, J. F. Manwell, "Hybrid/PV/Diesel system experiences", Renewable Energy, 16, 928-933, 1999.

[36]Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°3 (2006) 199 – 209 : Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen, S. Moussa et M. R. Benhaddadi. Centre de Développement des Energies Renouvelables Ecole Nationale Polytechnique, Département de l'Energie Electrique, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada (reçu le 02 Mai 2006 - accepté le 30 Septembre 2006).

[37] Claude Chevassu cours sur les couplages des alternateurs.

[38]Buzduga Stefania Roxana, stage de recherche 2-30 Novembre 2012 GREAH, Université du Havre, Etude d'un système hybride photovoltaïque éolien – diesel – structure et dimensionnement, rapport de stage.

[39] Wickert B., Nayar C.V., Lawrance W.B., Photovoltaic-diesel hybrid energy systems for off-grid rural electrification', International Journal of Renewable Energy Engineering, 1:1, 7 - 17, (1999).

[40]Ludmil Stoyanov Thèse préparé en cotutelle et soutenu pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN ENERGETIQUE. Thème : Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Université de Corse pascali PAOLI, Université technique de Sofia.

[41] Mauch K., Operating Agent current state of the art in pv hybrid mini-grids – early results from IEA PVPS task 11, <http://www.iea-pvps-task11.org/id26.htm>.

[42] Daniel yamegueu nguewo ,these expérimentation et optimisation d'un prototype de centrale hybride solaire pv/diesel sans batteries de stockage: validation du concept « flexy energy » , .19. Octobre 2012.

[43] Damien MAZILLE Vincent BOITIER, Documentation pour l'utilisation du logiciel PVSYST,V5. PDF.

[44] Manwell, J. F. et al: Hybrid2-A Hybrid System Simulation Model Theory Manual,National Renewable Energy Laboratory, Subcontract No. XL-1-11126-1-1,(1998).

[45] Yaron, G. et al: Solar Energy for Rural Communities: The case of Namibia, Intermediate Technology Publications, (1994).

[46] <http://www.homerenergy.com/>.

[47] WB 2004. Renew Energy Rural Dev. Washington DC: The World Bank Group; 20433.

[48] S. Djenas. “Elaboration des Zones Climatiques en Algérie”, PFE, CSTB, (1984).