

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



Département d'Electronique

Ecole Doctorale en Energies Renouvelables

Option : Photovoltaïque

MEMOIRE DE MAGISTER

Présenté par

M^{me} BOUACHA Saïda

Thème

**Etude des paramètres techniques
d'un système hybride multi sources
en milieu saharien**

Devant le jury composé de :

Président :	M.HADDADI,	Professeur, ENP Alger
Directeur de thèse :	A.MALEK,	Directeur de recherche, CDER Alger
Examineurs:	C.LARBES,	Professeur, ENP Alger
Examineurs :	M.S AIT CHEIKH,	Maître de conférences, ENP Alger

Année universitaire 2010/2011

**Ecole Nationale Supérieure Polytechnique
10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER**

Résumé

L'étude technique et économique d'un système hybride de production d'électricité d'origine renouvelable est une phase importante pour l'optimisation du système.

Pour un meilleur rendement et pour plus de fiabilité, l'étude des paramètres de dimensionnement du système hybride, et leur simulation permettront de mettre en évidence les différentes stratégies d'évaluation et les différentes techniques d'optimisation

Cette étude concerne l'étude technique et l'analyse économique des systèmes multi sources de production d'électricité d'origine renouvelable (PV, Eolien, Diesel) dans lesquels un certain nombre de sources d'énergie renouvelable (vent, soleil), de générateurs diesel et de composants de stockage d'énergie sont combinés pour remplir la demande énergétique d'une charge. Ces systèmes multi sources devront alimenter un village constitué d'une dizaine d'habitations situé sur 3 sites au sud Algérien à savoir : Adrar, Ghardaïa et Tamanrasset. Parmi les nombreux logiciels de calcul existant pour le dimensionnement, la simulation et l'analyse des systèmes multi source, le logiciel 'Homer®' a été choisi pour ce travail de recherche, pour analyser, simuler et dimensionner ce type de systèmes énergétiques renouvelables.

Mots clés: Energie photovoltaïque, Energie éolienne, Systèmes hybrides, optimisation.

Summary

The technical study and the economy of a hybrid system of electricity production of renewable origin is an important phase for the optimization of the system.

For a better return and for more reliability, a study of the effects of the parameters of sizing of the hybrid system, and their simulation will make it possible to highlight the diverse strategies of evaluation and the various techniques of optimization.

This study concerns the technical study and the economic analysis of the multi-systems sources of electricity production of renewable origin (PV, Wind energy, Diesel) in which certain renewable number of sources of energy (wind, sun), of diesel generators and components of storage of energy are combined to perform the energy demand of a load. These multi-systems sources will have to feed a village constituted by about ten houses situated on 3 sites of the Algerian South namely: Adrar, Ghardaïa and Tamanrasset.

Among the numerous software or programs of calculation existing for the sizing, simulation & analysis of system equipments and multi-system source, the software 'Homer®' was used for this research work, to analyze & size this type of renewable energy systems.

Keywords: photovoltaic Energy, Wind energy, Systems hybrids, optimization.

ملخص

الدراسة الفنية والاقتصادية لنظام هجين لتوليد الطاقة الكهربائية المتجددة هي مرحلة هامة من أجل تحسين النظام. للحصول على أفضل الأداء والمزيد من الموثوقية قمنا بدراسة الآثار المترتبة على عوامل تصميم نظام هجين و التي تسلط الضوء على مجموعة متنوعة من استراتيجيات التقييم لتحسين هذه الدراسة.

يعتمد هذا البحث على الدراسة الفنية والتحليل الاقتصادي لمصدر من مصادر الطاقة المتجددة (الكهروضوئية ، طاقة الرياح والديزل) ، يتم الجمع بين هذه الأخيرة ، مولدات الديزل ومكونات تخزين الطاقة لسد الطلب على الطاقة. وستوفر هذه الأنظمة الطاقة لقرية تتألف من عشرة منازل تقع في ثلاثة مواقع في جنوب الجزائر (أدرار، تمنراست و غرداية).

من بين العديد من البرامج تم اختيار برنامج "Homer®" في هذه الدراسة و البحث من اجل تحليل و محاكاة نظم الطاقة المتجددة

كلمات البحث : وحدات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح ونظم هجينة ، والتحسين

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre1: Les énergie renouvelables, Etat de l'art et perspectives	
1.1 Le secteur énergétique en Algérie	4
1.2 Les énergies renouvelables	4
1.2.1 Le photovoltaïque	7
1.2.2 L'énergie éolienne	7
1.2.3 Développement photovoltaïque et éolien	7
1.3 Le système hybride	9
1.3.1 Introduction sur les system hybride	9
1.3.2 Pourquoi le système hybride	10
1.3.3 Le système hybride PV/génératrice	11
1.3.4 Les catégories des systèmes hybrides PV/Diesel	11
1.3.4.1 Les systèmes hybrides PV/Diesel série	11
1.3.4.2 Les systèmes hybrides PV/Diesel avec interrupteur	12
1.3.4.3 Les systèmes hybrides PV/Diesel parallèle	12
1.3.5 Le système hybride PV/Diesel/Eolien	13
1.3.6 Le développement des systèmes hybrides	14
1.4 La complémentarité entre caractéristique de l'énergie solaire et l'éolienne	14
1.4.1 Le potentiel solaire en Algérie	14
1.4.2 Le potentiel éolien en Algérie	15
1.5 Conclusion	16
Chapitre 2: Eléments composant le système hybride d'électrification et leur opération de production électrique	
2.1 Introduction	17
2.2 Les générateurs photovoltaïques	17
2.2.1 Principe de la conversion photovoltaïque	17
2.2.2 Constitution	18
2.2.3 Propriétés	19
2.2.4 Modélisation des générateurs PV	19
2.2.5 Influences des paramètres externes	21
2.2.5.1 Courant de court-circuit	21
2.2.5.2 Tension de circuit ouvert	22
2.2.6 Puissance optimale	22
2.2.6.1 Influence de l'éclairement	22
2.2.6.2 Influence de la température	23
2.2.7 Le design d'un système photovoltaïque	24
2.2.8 Le photovoltaïque dans les systèmes hybrides	25
2.3 L'aérogénérateur	25
2.3.1 Puissance récupérable par une turbine	26
2.3.2 Caractéristiques des turbines éoliennes	28
2.3.2.1 Turbines à axe vertical	28

2.3.2.2 Turbines à axe horizontal	28
2.3.3 Production optimale d'énergie	29
2.4 Générateur électrogène	31
2.4.1 Générateur diesel dans un système hybride	31
2.5 Stockage d'énergie	31
2.5.1 Electricité de la batterie	31
2.5.2 Principe de fonctionnement	32
2.5.2.1 Capacités du stockage	32
2.5.3 Dessin	32
2.5.4 Installation	32
2.5.5 Batteries dans un système hybride	32
2.6 Appareils de conversion	32
2.6.1 Convertisseur	33
2.7 Conclusion	34

Chapitre 3: Dimensionnement d'un système hybride sur divers sites d'implantation

3.1 Introduction	35
3.2 Problématique de l'optimisation	36
3.3 Analyse économique	36
3.3.1 Coût d'un système multi source (photovoltaïque, éolien, diesel)	37
3.3.2 Investissement initial	37
3.3.3 Coût actualisé net total	38
3.3.4 Coût actualisé d'énergie	38
3.4 Aperçu sur logiciel Homer	39
3.4.1 Introduction de Homer	39
3.4.2 Simulation, optimisation et sensibilité des analyses dans Homer	39
3.4.3 Architecture	40
3.4.4 Dispatch du système	41
3.4.5 Analyses économiques	41
3.5 Grandeurs d'entrée de Homer	42
3.5.1 Exigences	42
3.5.2 Les Composants	42
3.5.3 Grandeurs d'entrées sensibles	43
3.6 Etapes de conception du système hybride	43
3.7 Sites d'implantation	43
3.8 Homer [®]	44
3.9 Données météorologiques	44
3.10 Caractéristiques complémentaires	47
3.11 Profil de charge	50
3.12 Paramètres de simulation	52
3.12.1 Paramètres techniques	52
a- Choix de l'onduleur	52
b- Choix du régulateur	52
c- Choix de la batterie	52
d- Choix du champ photovoltaïque et de l'aérogénérateur	52
3.12.2 Paramètres économiques	54
3.13 Conclusion	55

Chapitre 4: Résultats de simulation obtenus et discussions

4.1 Introduction	56
4.2 Système photovoltaïque seul	56
Site Adrar	58
Site Ghardaïa	58
Site Tamanrasset	59
4.3 Système photovoltaïque / diesel	66
Site Adrar	66
Site Ghardaïa	68
Site Tamanrasset	69
4.4 Système éolien seul	71
Site Adrar	71
Site Ghardaïa	71
Site Tamanrasset	71
4.5 Système éolien / diesel	74
Site Adrar	76
Site Ghardaïa	77
Site Tamanrasset	79
4.6 Système Photovoltaïque / éolien	80
Site Adrar	81
Site Ghardaïa	82
Site Tamanrasset	83
4.7 Système Photovoltaïque /éolien /diesel	84
Site Adrar	85
Site Ghardaïa	86
Site Tamanrasset	88
4.8 Discussion des principaux résultats	89
4.9 Conclusion générale	94

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Répartition de la puissance photovoltaïque installée par application

Tableau 1.2: Répartition de la puissance installée par ressource

Tableau 1.3: Potentiel solaire en Algérie

Tableau 3.1: Caractéristiques géographiques des trois sites

Tableau 3.2: Table représentant les données météorologiques des trois sites

Tableau 3.3: Equipement par usage

Tableau 3.4: Récapitulatif des besoins

Tableau 3.5: Les besoins mensuels

Tableau 3.6: Coûts sur les composants des systèmes et des équipements

Tableau 4.1: Caractéristiques techniques et économiques du système PV seul (Adrar)

Tableau 4.2: Caractéristiques techniques et économiques du système PV seul (Ghardaïa)

Tableau 4.3: Caractéristiques techniques et économiques du système PV seul (Tamanrasset)

Tableau 4.4: Caractéristiques techniques et économiques du système PV /Diesel (Adrar)

Tableau 4.5: Caractéristiques techniques et économiques du système PV /Diesel (Ghardaïa)

Tableau 4.6: Caractéristiques techniques et économiques du système PV /Diesel (Tamanrasset)

Tableau 4.7: Caractéristiques techniques et économiques du système Eolien seul (Adrar)

Tableau 4.8: Caractéristiques techniques et économiques du système Eolien seul (Ghardaïa)

Tableau 4.9: Caractéristiques techniques et économiques du système Eolien seul (Tamanrasset)

Tableau 4.10: Caractéristiques techniques et économiques du système Eolien/Diesel (Adrar)

Tableau 4.11: Caractéristiques techniques et économiques du système Eolien/Diesel (Ghardaïa)

Tableau 4.12: Caractéristiques techniques et économiques du système Eolien/Diesel (Tamanrasset)

Tableau 4.13: Caractéristiques techniques et économiques du système PV/Eolien (Adrar)

Tableau 4.14: Caractéristiques techniques et économiques du système PV/Eolien (Ghardaïa)

Tableau 4.15: Caractéristiques techniques et économiques du système PV/Eolien (Tamanrasset)

Tableau 4.16: Caractéristiques techniques et économiques du système PV/Eolien/Diesel (Adrar)

Tableau 4.17: Caractéristiques techniques et économiques du système PV/Eolien/Diesel (Ghardaïa)

Tableau 4.18: Caractéristiques techniques et économiques du système PV/Eolien/Diesel (Tamanrasset)

Tableau 4.19: Caractéristiques techniques et économiques des différents systèmes (Adrar)

Tableau 4.20: Caractéristiques techniques et économiques des différents systèmes (Ghardaïa)

Tableau 4.21: Caractéristiques techniques et économiques des différents systèmes (Tamanrasset)

Liste des figures

- Figure 1.1: Bilan des réalisations par wilaya
- Figure 1.2: Répartition de la puissance installée par application
- Figure 1.3: Répartition de la puissance installée par ressource
- Figure 1.4: La production des cellules solaires de production de 1986 à 2001
- Figure 1.5: la capacité de production éolienne dans le monde
- Figure 1.6: Système hybride sur Homer
- Figure 1.7: Système hybride PV/Diesel série
- Figure 1.8: Système hybride PV/Diesel avec interrupteur
- Figure 1.9: Système hybride PV/Diesel parallèle
- Figure 1.10: Modèle général d'un système hybride PV/Diesel/éolien
- Figure 1.11: Rayonnement solaire global à travers l'Algérie
- Figure 1.12: Carte de vent de l'Algérie
- Figure 2.1: Caractéristique $I(v)$ d'une cellule et d'une association de 3 branches en parallèle
- Figure 2.2: Schéma électrique équivalent d'un module PV
- Figure 2.3: Caractéristique (I-V) d'un module PV
- Figure 2.4: Caractéristique (p-v) d'un module PV
- Figure 2.5: Caractéristique I-V en fonction de l'éclairement
- Figure 2.6: Caractéristique P-V en fonction de l'éclairement
- Figure 2.7: Caractéristique I-V en fonction de la température
- Figure 2.8: Caractéristique P-V en fonction de la température
- Figure 2.9: Conversion de l'énergie cinétique du vent
- Figure 2.10: Différent types de turbines éoliennes
- Figure 2.11: Coefficient de puissance en fonction de la vitesse de rotation
- Figure 2.12: Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent
- Figure 3.1: Architecture de simulation
- Figure 3.20: Profil de charge d'une habitation en périodes (jan-Mai) et (Sep-Déc.)
- Figure 3.21: Profil de charge d'une habitation en période d'été (juin-Aout)
- Figure 3.22: Courbes de puissances
- Figure 4.1 : Rayonnement solaire journalier sur plan incliné
- Figure 4.2 : Rayonnement solaire journalier sur plan horizontal
- Figure 4.13 : Distribution de la charge
- Figure 4.14 : l'énergie produite par le champ PV
- Figure 4.19 : Evolution de la charge, la puissance photovoltaïque et l'état de charge de la batterie
- Figure 4.37 : Distribution de l'énergie Produite par le champ PV et diesel
- Figure 4.38 : Evolution de la charge, la puissance PV et Diesel et l'état de charge de la batterie
- Figure 4.40 : La production d'électricité par PV et Diesel et l'excédent d'électricité

Figure 4.82 : La production électricité par éolien et PV et l'excédent d'électricité

Figure 4.83 : Distribution des énergies produites par les générateurs éoliens et PV

Figure 4.85 : Distribution de la charge et des énergies produites par les générateurs éoliens et Diesel

Figure 4.86 : La production électricité par éolien et PV et l'excédent d'électricité

Figure 4.87 : Production mensuelle de l'éolien et PV

Figure 4.105 : system optimale avec une hauteur de 30m

Figure 4.106 : system optimale avec une hauteur de 25m

Figure 4.107 : system optimale avec une hauteur de 20m

Figure 4.108: Coût du carburant en fonction du taux d'intérêt pour une hauteur de 30 m

Figure 4.109 : Coût du carburant en fonction du taux d'intérêt pour une hauteur de 25 m

Figure 4.110 : Coût du carburant en fonction du taux d'intérêt pour une hauteur de 35 m

Figure 4.111 : système optimale avec un taux d'intérêt de 4%

Figure 4.112 : système optimale avec un taux d'intérêt de 6%

Figure 4.113 : système optimale avec un taux d'intérêt de 6%

Figure 4.114 : système optimale avec un taux d'intérêt de 12%

Liste des symboles

- ρ : Masse volumique de l'air
- d : derating facteur
- G^* : Irradiation de référence, 1 kW/m^2
- I : Courant de saturation inverse de la diode
- i : Taux d'intérêt
- m : Masse d'air
- N : Durée de vie du système
- n : Facteur d'idéalité de la diode, compris entre 1 à 5 en pratique
- q : Charge de l'électron
- R : Rayon de l'hélice
- T : Température de jonction
- T^* : Température ambiante, égale à 25 °C
- v : Vitesse du vent
- V : Tension de polarisation
- λ_{opt} : Vitesse normalisée
- η_{ond} : Rendement de l'onduleur
- η_{dech} : Rendement de décharge
- $C_{\text{ann, tot}}$: Coût annuel total
- C_p : Caractéristique de puissance éolienne
- E_c : Energie cinétique
- E_{ond} : Energie à la sortie de l'onduleur
- Fa : Facteur d'actualisation
- I_{cc} : Courant de court-circuit
- i_{cc}^* : Courant de court-circuit à $T = 25 \text{ °C}$ et $G = 1 \text{ kW/m}^2$
- kb : Constante de Boltzman (J/K)

N_j : Nombre de jours d'autonomie

N_p : Cellules en parallèle

N_s : Cellules en série

N_{cel} : Nombre de cellules en série dans une batterie

P_{pv} : Puissance disponible en sortie du générateur

R_p : Résistance shunt

R_s : Résistance série

R_Ω : Vitesse linéaire périphérique en bout de pale de l'hélice

V_{co} : Tension du circuit ouvert

$V_T = (n \cdot k_s \cdot T) / q$: Potentielle thermodynamique

V_{dech} : Tension moyenne d'une cellule durant la décharge

CAN : Coût actuel net total

CAE : Coût actualisé d'énergie

E_{PV} : Energie généré par le champ PV

E_{bat} : Energie exigée de la batterie par décharge

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de la plus grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

En vertu du Protocole de Kyoto, l'Union Européenne s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 8 % sur la période 2008-2012. Les énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydroélectrique et la biomasse doivent jouer un rôle important pour pouvoir atteindre cet objectif. Dans ce contexte, en septembre 2001, l'Union Européenne a adopté une directive qui est relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelable.

On entend par énergie renouvelable les énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques, selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant ainsi avec les énergies fossiles du point de vue, coût et performance de production.

Cependant, leur système de conversion d'énergie en électricité souffre souvent d'un manque d'optimisation.

Pour cela, bien qu'il existe de plus en plus de travaux de recherches prouvant la viabilité de sources comme, par exemple, l'énergie photovoltaïque (PV) ou l'énergie éolienne, beaucoup de réticences existent encore pour installer ces systèmes à grande échelle, autant en production de masse que chez des particuliers.

A travers la combinaison de dispositifs de conversion d'énergie renouvelable, tels que le module solaire, la turbine éolienne avec le générateur diesel et un système de stockage, il est possible de produire l'énergie électrique dans les zones rurales ou les sites isolés d'une façon compétitive. Tels systèmes sont définis comme étant des systèmes hybrides et sont utilisés pour remplir la demande d'énergie des sites isolés ou les zones rurales.

Les méthodes d'intégration des générateurs d'énergie renouvelable dans les systèmes de production hybrides présentent un intérêt croissant. Et cette étude vise en particulier les installations qui tirent une partie de leur puissance électrique d'une source d'énergie solaire et éolienne, l'objectif visé étant un meilleur rendement et plus de fiabilité.

Le dimensionnement d'un système hybride est une phase importante de sa conception. Du moment que le coût capital des équipements est le composant majeur du prix de l'électricité d'origine renouvelable, le surdimensionnement de ces équipements a un effet nuisible sur le prix de la puissance générée. Le sous dimensionnement, d'un autre côté, réduit la fiabilité du système.

L'étude des paramètres de dimensionnement de ce type d'application et leur simulation permettra de mettre en évidence les stratégies d'évaluer les techniques d'optimisation. L'objectif de ce travail est d'optimiser et dimensionner un système de production d'électricité issu de la combinaison d'une ou plusieurs sources d'énergie renouvelables (solaire, éolienne) avec un générateur Diesel.

Un grand nombre de logiciels existent actuellement, pour l'analyse, la simulation et le dimensionnement de ces systèmes. Ces Outils présentent les différents degrés de complexité et de précision suivant la tâche pour laquelle chacun des logiciels a été développé.

A cet effet, le travail proposé consiste à dimensionner et simuler un système de production d'électricité issu de différentes combinaisons de dispositifs de conversion d'énergie renouvelable (solaire, éolienne) avec un générateur électrogène pour une alimentation électrique d'un village situé sur différentes zones éloignées de l'Algérie. Le dimensionnement et la simulation ont été réalisés en utilisant le logiciel: **Homer®**.

Pour cela :

Le chapitre 1 donne un aperçu général sur les énergies renouvelables, les potentiels énergétiques solaire et éolien au sud Algérien et les systèmes hybrides appropriés.

Le chapitre 2 consiste en une description des composants du système hybride et leur fonctionnement, et la modélisation présente les différentes configurations de systèmes hybrides (PV, éolien, Diesel).

Le chapitre 3 présente les différentes configurations de systèmes hybrides (PV, éolien, Diesel), le dimensionnement et la simulation de chacun de ces systèmes, et l'étude technique et économique des différents systèmes étudiés.

Au **chapitre 4**, l'analyse des principaux résultats obtenus a été effectuée. Il s'agit d'étudier les configurations des systèmes hybrides optimisés issus du chapitre précédent.

En conclusion générale, nous présentons une synthèse des travaux effectués ainsi que les principaux résultats obtenus puis les perspectives à entreprendre dans l'avenir.

Chapitre 1

Les Energies Renouvelables

Etat de l'art et perspectives

1.1 Le secteur énergétique en Algérie

Avec une production effective de 40 Millions kWh, le taux de couverture des besoins du pays en électricité est de l'ordre de 95 %. Plus de 5,6 millions de clients sont abonnés au réseau de la société par actions Sonelgaz.

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4 % par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7 % par année. La distribution de l'électricité connaît depuis quelques années de fortes perturbations du fait d'une augmentation croissante de la demande intérieure.

L'Algérie vise à exploiter les potentialités exceptionnelles d'ensoleillement pour utiliser, mettre au point et développer les applications de l'énergie solaire à l'électrification des sites isolés (zones désertiques du Sud, notamment les 4 wilayas du Sud : Adrar, Illizi, Tamanrasset, Tindouf) et les régions montagneuses. Des fermes éoliennes sont en projet à Tindouf, Timimoune et à Adrar.

1.2 Les énergies renouvelables

On appelle énergies renouvelables, un ensemble de sources d'énergies qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental.

Elles sont d'origine majoritairement solaire et pour les énergies des vents et des marées, elles sont aussi dues à l'énergie cinétique terrestre et à l'énergie de liaison gravitationnelle.

- Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire de la chaleur ou d'un courant électrique.
- La biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. C'est de l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant).
- L'éolien a un origine plus complexe, l'énergie du vent, qui est utilisée de manière mécanique

- L'hydroélectrique vient de la transformation de l'énergie solaire en énergie potentielle de gravitation par évaporation de l'eau, puis par transformation en électricité.
- La géothermie est l'utilisation directe des gradients de température terrestre (énergie renouvelable) ou de sources chaudes (parfois non renouvelable).

Les réalisations algériennes dans le domaine de l'énergie propre dite renouvelable sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution du parc énergie renouvelable mondial ou européen, qui a atteint des objectifs très avancés.

L'utilisation des énergies renouvelables en Algérie, n'a pas dépassé le seuil d'expérience durant les trois dernières décennies, malgré la situation géographique. L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (Hauts Plateaux) et il est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud.

Au sud algérien, les premières expériences ont été effectués au début des années quatre-vingt, où la première station d'énergie soleil a été installée à Melouka par une société belge.

La station est aujourd'hui à l'arrêt. Le recours aux énergies renouvelables au sud algérien est indispensable et prioritaire dans tout développement durable de la région, les distances existants entre les localités, dispersion de la population dans le sable rendre le raccordement au réseau électrique très coûteux.

-Puissance installée par wilaya [1]

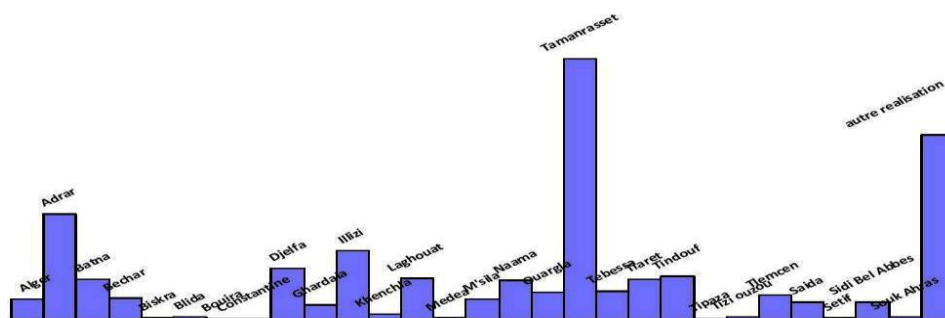


Figure 1.1: Bilan des réalisations par Wilaya

-Répartition de la puissance installée par application [1]

Applications	Puissance installée (kW _C)
Electrification	1353
Pompage	288
Eclairage public	48
Télécommunication	498
Autres	166
Total	2353

Tableau 1.1: Répartition de la puissance photovoltaïque installée par application

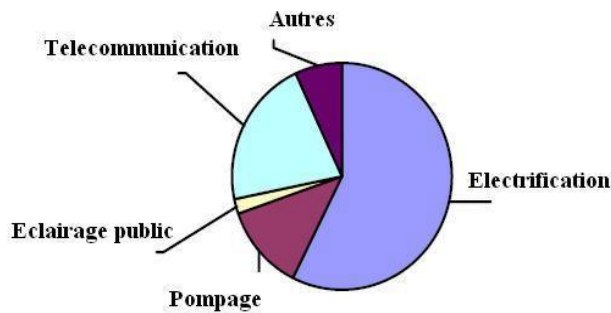


Figure 1.2: Répartition de la puissance installée par application

Répartition de la puissance installée par ressource [1]

Ressource	Puissance installée (kW _C)
Solaire	2280
Eolien	73
Total	2353

Tableau 1.2: Répartition de la puissance installée par Ressource

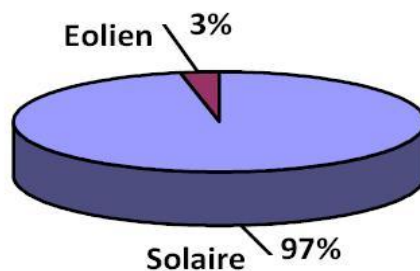


Figure 1.3: Répartition de la puissance installée par ressource

1.2.1 Photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement solaire. Le courant continu ainsi produit est directement utilisable.

La fabrication des panneaux solaires est actuellement coûteuse bien que la matière première (silice) soit abondante et peu onéreuse.

A l'heure actuelle, il faut quand même 5 à 8 ans pour qu'un panneau produise l'énergie que sa construction a utilisée. Un autre inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à la technologie employée, des avancées technologiques sont en cours de réalisation.

Les panneaux solaires sont faciles à mettre en œuvre. Leur intégration dans un bâtiment peut aussi ajouter une touche esthétique, Ils apportent une bonne réponse aux besoins énergétiques limités dans les sites isolés et dispersés (télécommunication, balises maritimes...).

L'énergie photovoltaïque est en très forte progression : en 2001, l'Europe comptait Environ 250 MW installés ; en 2003, ce chiffre est monté à 560 MW (Mirecki, 2005).

1.2.2 Eolien

La ressource éolienne provient du vent, lequel est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre : Une différence de pression se crée entre certaines régions de la planète, en fonction du réchauffement ou du refroidissement local, mettant ainsi des masses d'air en mouvement.

Exploitée depuis l'antiquité puis longtemps négligée, cette énergie connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne maintient un taux de croissance de 30% par an depuis une dizaine d'années. L'Europe, principalement sous l'impulsion allemande, scandinave et espagnole, comptait environ 15000 MW de puissance installée en 2000. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000MW de puissance installée dans le monde.

Les prévisions pour 2010 font état d'une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre de 70000 MW (Mirecki, 2005).

1.2.3 Développement du photovoltaïque et de l'éolien [2]

Le changement du climat est un problème global à long terme, et implique des interactions complexes entre les questions climatiques, de l'environnement, économiques, politiques, institutionnelles et sociales, et les processus technologiques.

Depuis la découverte d'électricité en 1831 à travers beaucoup d'usages dans le présent, en utilisant le fossile d'alimentation de production électrique et rencontrer rapidement

l'augmentation de l'énergie dans le monde et la demande d'énergie a conduit le rôle principal de la forte croissance de concentration dans le gaz de serre, NO_x , et SO_x .

En outre, l'exploitation des ressources fossiles serait bientôt consommée avec l'augmentation rapide de la demande d'énergie de nos jours, surtout pour quelques pays en déficit d'énergie.

Les nouvelles technologies, y compris la technologie du film mince, le nouveau concentrateur approchent (Frasa et McConnell, 2002), etc., ont aidé pour une fourniture en adéquation avec la production.

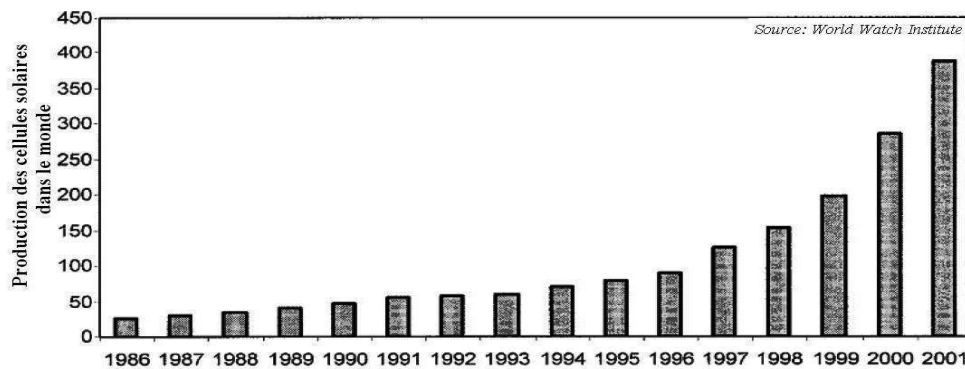


Figure 1.4: Production des cellules solaires entre 1986 et 2001

L'énergie du vent a augmenté assez rapidement dans le monde, et elle est devenue la ressource énergétique du moment, comme cela est montré en Figure 1.2. En 2002, la capacité en éolien arrive à 31,000 MW, ce qui veut dire qu'annuellement elle est de 67.89×10^9 kWh, la production est propulsée avec un facteur de capacité de 0.25. Cette augmentation dans l'éolien reflète une politique, spécialement en 1996 'Accord Kyoto sur le changement climatique', pour une demande croissante pour nouvelle électrification et une amélioration dans la technologie.

La mise à jour des améliorations dans la technologie et l'application de l'éolien à grande échelle, le coût d'électricité d'utilité sur l'échelle des systèmes du vent est passé de plus de 80 % sur les 20 dernières années, de 30 c\$ (unité Américaine) par kWh dans les proches années 1980 à moins de 5 c\$/kWh de nos jours. Les coûts continuent à diminuer plus sur les plus grandes centrales qui ont été construit sur la technologie avancée introduite (AWEA, 2003).

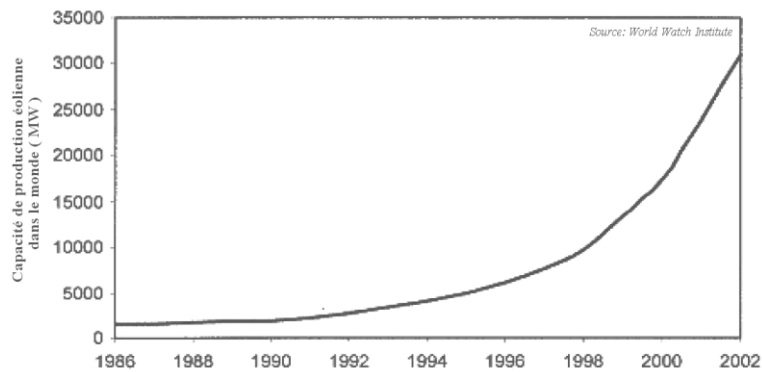


Figure 1.5 la capacité de production éolienne dans le monde

Avec plus d'inquiétudes au sujet des questions sur l'environnement et les développements rapides de PV et de la génération de la puissance du vent dans les marchés, de plus en plus de recherches et études ont été emportées pour enquêter sur leurs applications. De nos jours, leurs applications commerciales sont devenues aussi très populaires.

1.3 Système hybride

1.3.1 Introduction aux systèmes hybrides

Un système d'alimentation hybride, ou le système hybride, est défini ici comme la collection d'un ou plusieurs combustibles fossiles et renouvelables, où on actionne les sources de courant électrique pouvant servir à une petite demande énergétique.

Les sources considérées communes pour avoir un courant électrique pour des systèmes hybrides incluent le photovoltaïque, la petite hydraulique, les générateurs électrogènes diesel, et les petites turbines éoliennes.

Les batteries, les chargeurs – contrôleurs, les inverseurs ou les redresseurs sont également des parties indispensables et nécessaires pour des systèmes hybrides de production électrique.

Beaucoup d'autres générateurs sont possibles, mais ne sont pas communs pour une autre application.

La micro turbine, la biomasse ou le biogaz à gaz normal peuvent être appliquées avec ce type de générateurs. Des générateurs de micro hydraulique et les piles à combustible sont justement quelques uns de ces possibilités.

Elles sont moins communes en raison du prix, de la nouveauté de la technologie ou du besoin de ressources très spécifiques à un endroit.

Ces divers systèmes hybrides ne sont pas considérés dans ces analyses.

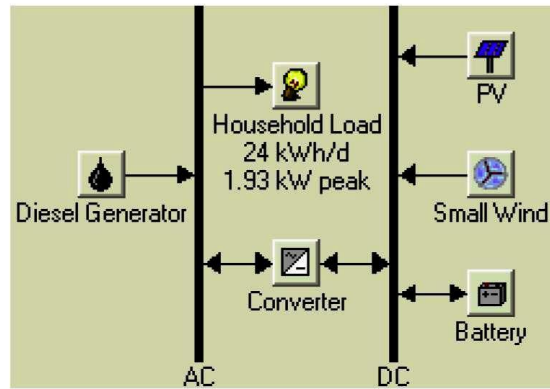


Figure 1.6: Schéma d'un système hybride sur Homer

1.3.2 Pourquoi le système hybride

La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique.

Il existe plusieurs combinaisons de systèmes hybrides, à savoir: éolien-diesel, photovoltaïque-diesel, et éolien- photovoltaïque-diesel.

Ces mêmes sources d'énergies peuvent être combinées avec d'autres sources, par exemple l'énergie hydraulique.

Les méthodes d'évaluation des systèmes hybrides éolien/photovoltaïque autonomes et leurs avantages se sont beaucoup développées ces dernières années.

L'optimisation de l'énergie éolienne et photovoltaïque avec un stockage électrochimique (il existe d'autre solution de stockage notamment l'utilisation de l'hydrogène qui donne une autonomie beaucoup plus importante que celles des batteries d'accumulateurs), avec ou sans apport de diesel, dépend beaucoup des modèles économiques de chaque système pris séparément (éolien et photovoltaïque).

Un logiciel a été développé au laboratoire pour évaluer le dimensionnement optimal de chaque sous système.

L'avantage d'un système hybride par rapport à un système pur éolien ou pur photovoltaïque, dépend de beaucoup de facteurs fondamentaux : la forme et le type de la charge, le régime du vent, le rayonnement solaire, le coût et la disponibilité de l'énergie, le coût relatif de la machine éolienne, le champ photovoltaïque, le système de stockage électrochimique et d'autres facteurs d'efficacité.

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement économiques pour les installations de faibles puissances. Pour les systèmes d'énergie autonomes, le coût du stockage représente la plus grande contrainte du coût global du système pour les installations de grandes puissances.

Minimiser le coût du stockage et optimiser sa capacité est la raison essentielle de la combinaison des systèmes éolien et photovoltaïque.

1.3.3 Système hybride PV/génératrice

Pour les applications hors réseau, il est possible d'avoir un système PV fonctionnant en parallèle avec une génératrice diesel. Les systèmes sont alors complémentaires: le système PV permet de réduire la consommation en combustible fossile et les coûts d'entretien de la génératrice; l'utilisation de la génératrice permet d'éviter le surdimensionnement du système PV (modules PV et batteries d'accumulateurs) qui serait nécessaire pour répondre à la demande en tout temps.

Le système photovoltaïque fournit une énergie intermittente mais souvent moins coûteuse dans les régions éloignées. La génératrice sert d'énergie d'appoint, selon la demande. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries.

Les génératrices peuvent utiliser plusieurs types de combustibles fossiles : essence, mazout #2 (diesel), propane ou gaz naturel.

1.3.4 Catégories de systèmes hybrides PV/Diesel [4]

Ces systèmes génèrent de l'électricité en combinant un champ PV avec un générateur Diesel. Ils peuvent être groupés, selon leur configuration.

1.3.4.1 Systèmes hybrides PV/Diesel série

Dans ce système (Figure 1.7), l'énergie issue du générateur Diesel et du champ PV est utilisée pour charger un parc de batteries. Le générateur diesel est connecté en série avec l'onduleur pour alimenter la charge. Le générateur Diesel ne peut pas alimenter directement la charge.

L'onduleur convertit la tension continue du parc de batteries à une tension alternative pour alimenter la charge. La capacité du parc de batteries et l'onduleur devrait être capable de délivrer une puissance supérieure au pic de la charge. La capacité du générateur Diesel

devrait, également, être capable de délivrer une puissance supérieure au pic de la charge et charger le parc de batterie simultanément.

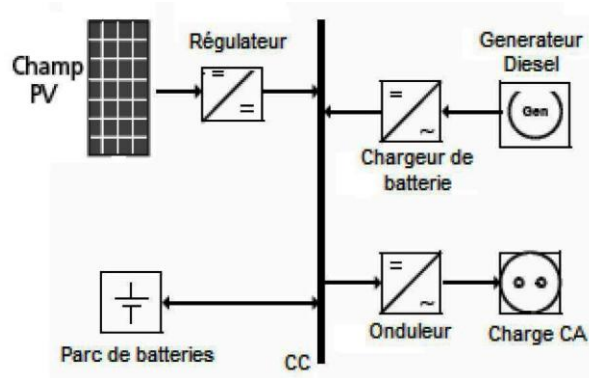


Figure 1.7: Système hybride PV/Diesel

1.3.4.2 Système hybride PV/Diesel avec interrupteur

Dans ce système (Figure 1.8), le parc de batteries peut être chargé par le générateur Diesel et le champ Photovoltaïque. La charge peut être alimentée directement par le générateur Diesel. Si la puissance délivrée par le générateur Diesel excède la charge, l'excès d'énergie sera utilisé pour recharger le parc de batteries. Durant la période de faible demande d'énergie, le générateur Diesel est interrompu et la charge est alimentée par le champ PV et l'énergie stockée par le parc de batteries. En comparant l'efficacité de conversion globale, le système avec interrupteur est plus efficace que le système série.

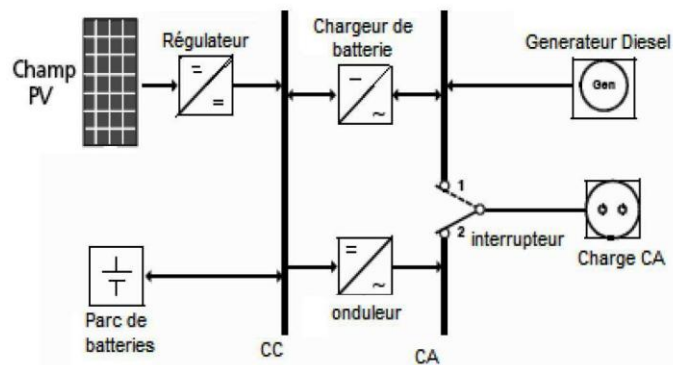


Figure 1.8: Système hybride PV/Diesel avec interrupteur

1.3.4.3 Système hybride PV/Diesel parallèle [4]

Un système hybride parallèle est illustré dans la figure (1.9). Le générateur Diesel peut alimenter la charge directement. Le champ PV et le parc de batteries sont connectés en série avec le convertisseur bidirectionnel pour alimenter la charge. Durant la période de faible demande d'énergie, l'énergie en excès issue du champ PV est utilisée pour recharger le parc

de batteries. Le convertisseur bidirectionnel peut charger le parc de batteries quand l'excès d'énergie est disponible à partir du générateur Diesel.

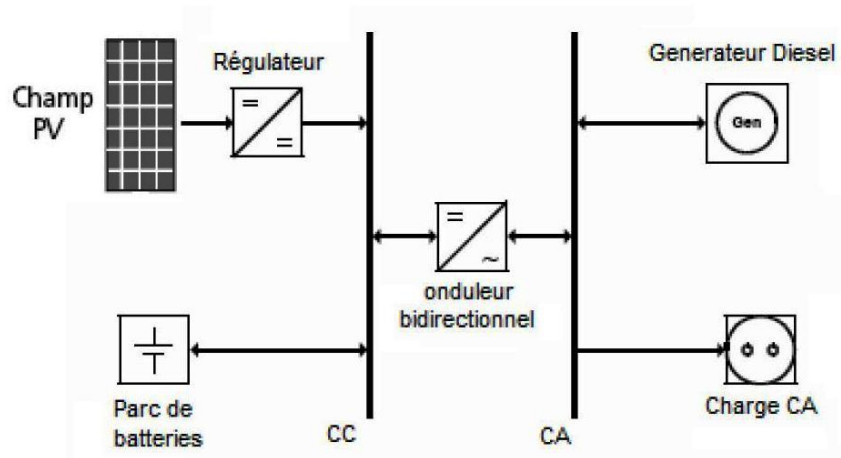


Figure 1.9 Système hybride PV/Diesel parallèle

1.3.5 Système Hybride PV/Diesel/Eolien

Les systèmes PV/Diesel peuvent également être couplés avec d'autres sources d'énergie telles que les turbines éoliennes et les microcentrales hydrauliques, lorsqu'il y a une complémentarité des productions électriques. Dans les régions ensoleillées en été avec des vents forts en hiver, les systèmes PV/Eoliens/Diesel permettent d'exploiter en plus l'énergie éolienne pour couvrir une partie des exigences de la charge qui autrement serait alimentée par un groupe diesel.

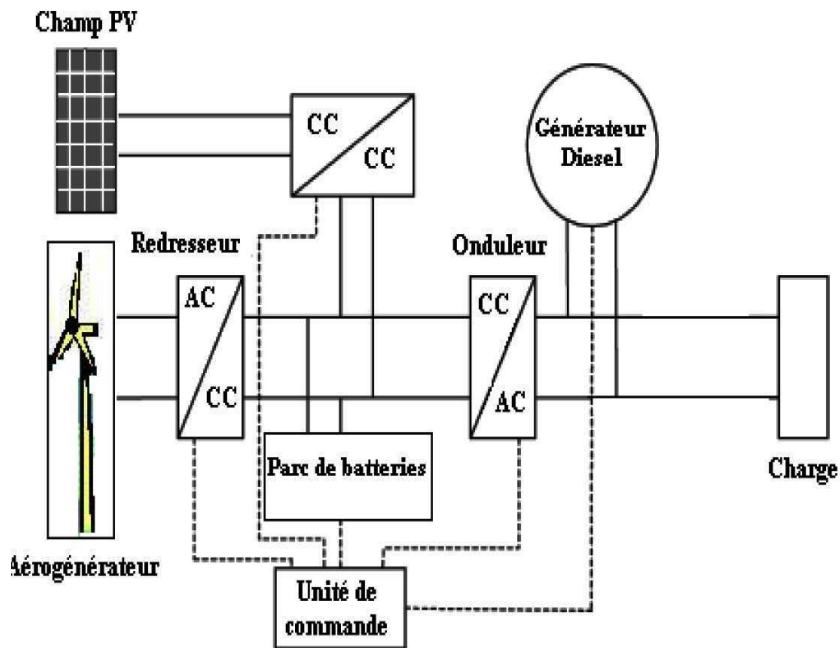


Figure 1.10: Modèle général d'un système hybride PV/Diesel/éolien

1.3.6 Développement des system hybride [2]

Ces dernières années, le photovoltaïque et l'éolien sont sollicités principalement dans l'augmentation des plans d'installations hybrides à grande échelle pour y rencontrer l'exigence de la protection de l'environnement et surtout l'électricité produite demandée.

Simultanément, les systèmes hybrides photovoltaïques - éoliens autonomes emploient un parc de batterie, qui devient une option nécessaire pour la production d'une faible électricité à des emplacements éloignés, où aucune production ne se fait sur le réseau.

Depuis que le système hybride solaire-éolien de la puissance à propulser peut offrir une haute précision de provision du pouvoir, le système applications hybride solaire -éolienne d'enquête gagne plus d'inquiétudes de nos jours.

Les nombreuses études relatées dans le rapport avec les applications hybrides photovoltaïques éoliennes ont été conduites dans les décennies passées.

Ces études sont principalement concentrées sur les enquêtes de faisabilité dans les emplacements individuels. Les possibilités d'utiliser le système solaire et éolien dans plusieurs quartiers ou les pays (tels que Jordanie, Inde, Mexique, Amérique, Japon, Australie, Arabie saoudite, etc.) ont été effectuées (Barlow *et al.*, 1988; Le Huacuz *et al.*, 1994; Le Mizany *et al.*, 1994; Le Kimura *et al.*, 1996; Zahedi 1997; Le Kurozumi *et al.*, 1998; Comportez-vous 1999; Elhadidy et Shaahid 2000), et les systèmes hybrides sont prouvés pour être très pratiques et disponibles dans ces emplacements considérés.

1.4 Complémentarité entre les caractéristiques de l'énergie solaire et éolienne

1.4.1 Potentiel solaire en Algérie [3]

L'Algérie possède un gisement solaire parmi les plus élevés dans le monde, la durée moyenne d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de 3500 heures, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable dans cette région, s'il est exploité de manière économique, le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.

régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m2/an)	1700	1900	2650

Tableau1.3: Potentiel solaire en Algérie

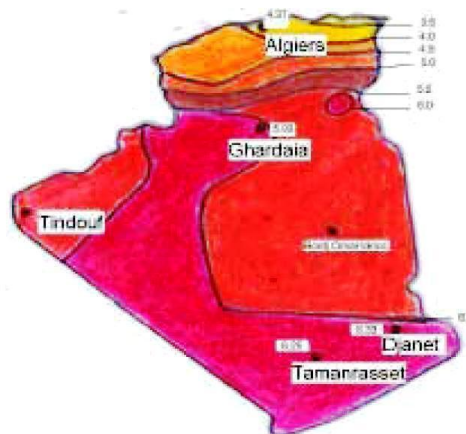


Figure 1.11: Rayonnement solaire global à travers l'Algérie [3]

1.4.2 Potentiel en énergie éolienne en Algérie

La première expérience du pompage d'eau avec l'éolien en Afrique a été effectuée à Adrar, ce système éolien a été saboté en 1962. L'Algérie a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s, selon la carte des vents).

Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux et le Sahara.

Le potentiel énergétique est énorme, sachant que la région d'Adrar se trouve dans un couloir de vent de 6 m/s.

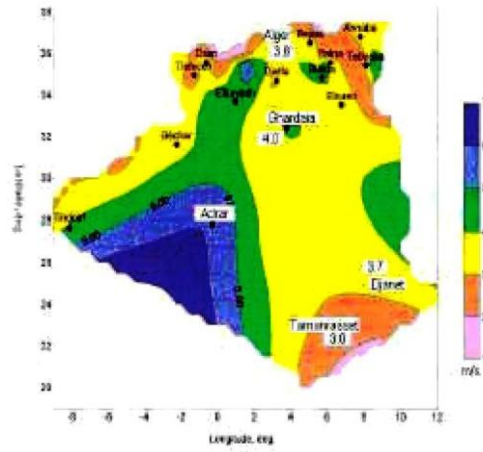


Figure1.12: Carte de vent de l'Algérie [3]

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, un panorama sur les énergies renouvelables a été présenté. On a parlé de l'état de l'art dans le domaine de chacune des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien, thermique,...) et surtout sur les aspects des systèmes hybrides (photovoltaïque-éolien, photovoltaïque-générateur diesel, ...).

Chapitre 2

Éléments composants le système hybride d'électrification et leur opération de production électrique

2.1 Introduction

Ce chapitre fait la description des éléments utilisés dans un système hybride. Comme il sera vu dans les chapitres suivants, l'algorithme élaboré peut utiliser de nombreuses caractéristiques réelles de l'ensemble du système hybride et de leur fonctionnement.

2.2 Les générateurs photovoltaïques

Le module PV est l'élément de base de tout système photovoltaïque. Il comprend une quarantaine de photopiles branchées en série de façon à constituer en permanence une seule unité d'énergie électrique à puissance nominale de 35 à 75 watts.

Il faut cependant noter qu'en dépit de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans la photopile, ni sous forme chimique sous aucune autre forme. Ce n'est pas donc une pile mais un convertisseur instantané, qui pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement solaire.

Afin de déterminer la puissance que peuvent fournir les modules PV aux dispositifs de stockage et à la charge électrique, on présente dans ce chapitre le principe de fonctionnement et le modèle du générateur PV.

2.2.1 Principe de la conversion photovoltaïque

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'utilisation des cellules solaires a débuté dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après la guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leurs tailles mais il faudra attendre la crise énergétique des années soixante dix pour que les gouvernements et les industries investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

Aujourd'hui, les laboratoires de recherche et les industries travaillent en collaboration pour développer de nouveaux concepts ou de nouveaux procédés susceptibles d'améliorer les performances électriques et de réduire les coûts des cellules solaires. C'est ainsi que les modules photovoltaïques modernes, composés de cellules interconnectées, ont largement prouvé leur efficacité et leur haute fiabilité. De plus, leur champ d'application ne cesse de s'élargir, du pompage à l'éclairage, en passant par toutes les applications électroniques.

La cellule PV est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique.

2.2.2 Constitution

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées.

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes (N_p) en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par:

$$P_{pv} = N_s \times V_{pv} \times N_p \times I_{pv} \quad (2.1)$$

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les ($N_s \cdot N_p$) cellules se comportent toutes de façon identiques. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_{max} . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique $P(V)$ du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée V_{opt} et d'un courant optimal noté I_{opt} pour réduire les dysfonctionnements, les fabricants ont choisi de ne pas commercialiser des cellules PV Seules.

Ainsi, les générateurs PV se trouvent souvent sous forme de modules pré-câblés, constitués de Plusieurs cellules, aussi appelés par abus de langage panneaux PV. Chaque référence de module a ses propres caractéristiques électriques garanties à $\pm 10\%$ selon le lot de fabrication.

2.2.3 Propriétés

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée.

Nous rappelons brièvement, dans ce paragraphe, le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement.

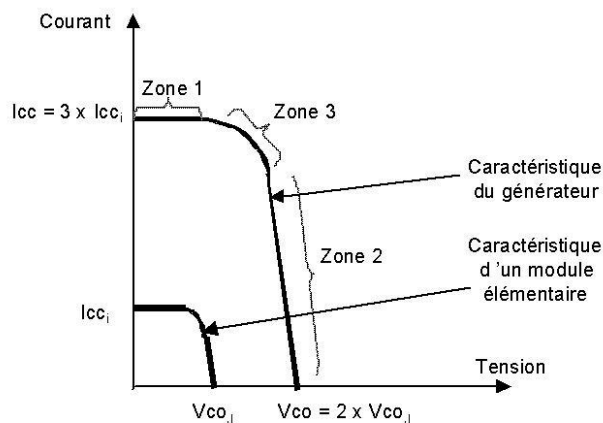


Figure 2.1: Caractéristique I (V) d'une cellule et d'une association de 3 branches en parallèle ayant chacun 2 cellules en série

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{CC} et de la tension à vide V_{CO} sont plus ou moins importantes (Figure 2.1).

2.2.4 Modélisation des générateurs photovoltaïques

Le schéma électrique équivalent d'un module PV est donné à la figure (2.2), où il représente le photo_courant créé dans les photopiles par le rayonnement solaire. Il est proportionnel à l'éclairement reçu et opposé au courant de la diode équivalente. M représente le courant de la diode à l'obscurité. R_s est la résistance série, due principalement à la difficulté de collecter les charges à la surface photosensible. R_p est la résistance parallèle et elle est une conséquence de l'état de la surface le long de la périphérie des photopiles. R_L représente la charge électrique [6].

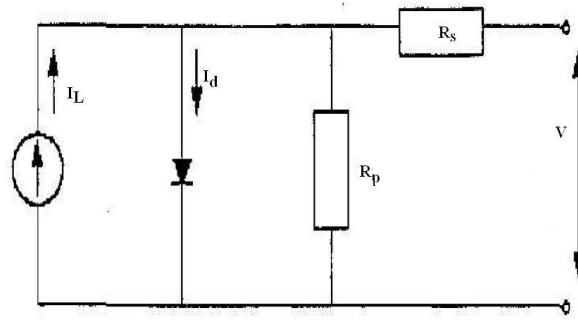


Figure 2.2: Schéma électrique équivalent d'un module PV

D'après le schéma électrique de la figure 2.2, le courant de sortie d'un module PV sous éclairement est:

$$I = I_L - I_d - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (2.1)$$

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (2.2)$$

Où

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode; V : Tension de polarisation; $V_T = (n \cdot k \cdot T) / q$ est le potentiel thermodynamique, avec: n le facteur d'idéalité de la diode, compris entre 1 et 5 en pratique, k la constante de Boltzman ($J/^\circ K$), T est la température de jonction et q la charge de l'électron.

Un module PV de caractéristiques idéales, est tel que R_s soit nulle et R_p devienne infiniment grande. D'où le courant de sortie:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{V}{V_T} \right)} \right] \quad (2.3)$$

2.2.5 Influence des paramètres externes

Les figures 2.3 et 2.4 {caractéristiques (I-V) et (P-V) du module PV} présentent, pour un éclairement et une température donnés, trois points remarquables: le courant de court-circuit ' I_{cc} ', la tension de circuit ouvert ' V_0 ' et la puissance optimale qui est la puissance maximale

' P_m ' délivrées par les modules PV. Donc pour extraire le maximum d'énergie des modules PV, il faut les faire fonctionner au point de puissance maximale.

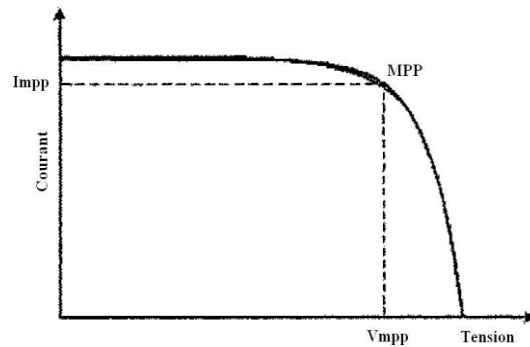


Figure 2.3: Caractéristique (I-V) d'un module PV

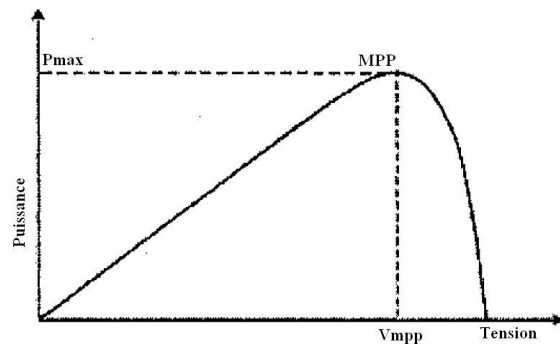


Figure 2.4: Caractéristique (P-V) d'un module PV

2.2.5.1 Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit est représenté par l'expression suivante:

$$I_{cc} = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{R_s \cdot I_{cc}}{V_T} \right)} - 1 \right] - \frac{R_s \cdot I_{cc}}{R_p} \quad (2.4)$$

Pour la plupart des modules photovoltaïques (dont la résistance est faible), et sous éclairage normal, on peut négliger le terme $I_0 \left[\exp(R_s \times I / V_T) - 1 \right]$ devant ' I_L '. L'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$I_{cc} = I_L - \frac{R_s \cdot I_{cc}}{R_p} \quad (2.5)$$

Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infini), le courant I_{cc} se confond avec le photo courant.

2.2.5.2 Tension de circuit ouvert

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul. C'est la tension maximale d'un générateur PV. De ce fait, la tension en circuit ouvert, s'écrira:

$$V_{co} = V_T \cdot \ln \left[\left(I_L - \frac{V_{co}}{R_p} \right) \frac{1}{I_0} + 1 \right] \quad (26)$$

Dans le cas d'un module PV idéal, sa valeur est:

$$V_{co} = V_T \cdot \ln \left[\frac{I_L}{I_0} + 1 \right] \quad (27)$$

$$\text{Où: } \frac{V_{co}}{R_p \cdot I_0} \ll \frac{I_L}{I_0} + 1$$

2.2.6 Puissance optimale

La puissance maximale utile P_0 s'obtient en annulant la dérivée de la puissance.

$$\left(\frac{dP}{dI} \right) = \left(\frac{dVI}{dI} \right) = 0 \quad \text{Ce qui donne:} \quad \left(\frac{dV}{dI} \right)_{op} = - \frac{V_{op}}{I_{op}}$$

$$\frac{V_{op}}{I_{op}} = \frac{V_T}{(I_{cc} + I_0 - I_{op})} \quad (2.8)$$

2.2.6.1 Influence de l'éclairement

Les figures 2.5 et 2.6 donnent respectivement la caractéristique I-V et P-V d'un module PV en fonction de l'éclairement incident et à température ambiante.

Nous constatons que les variations du courant de court-circuit (c'est-à-dire pratiquement le photo courant créé dans le module PV) est proportionnel au flux solaire incident. D'ou la forte influence de l'éclairement sur le courant débité par le module. Cette influence se traduit par une augmentation de la puissance disponible dans les modules PV chaque fois l'éclairement augmente et à chacune des valeurs du flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pouffait fournir un module PV [7].

i_{cc}^* représente le courant de court-circuit à $T = 25^\circ\text{C}$ et $G = 1 \text{ kW/m}^2$; α_1 : ($A1^\circ\text{C}$) le coefficient obtenu empiriquement; G^* est l'irradiation de référence vaut 1 kW/m^2 ; T^* est la température ambiante égale à 25°C .

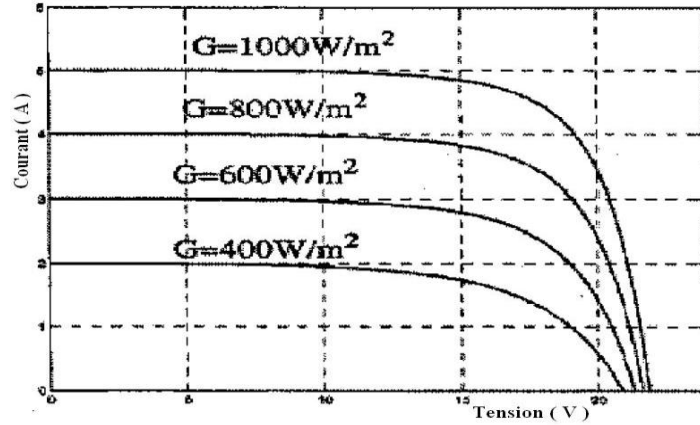


Figure 2.5: Caractéristique I-V en fonction de l'éclairement

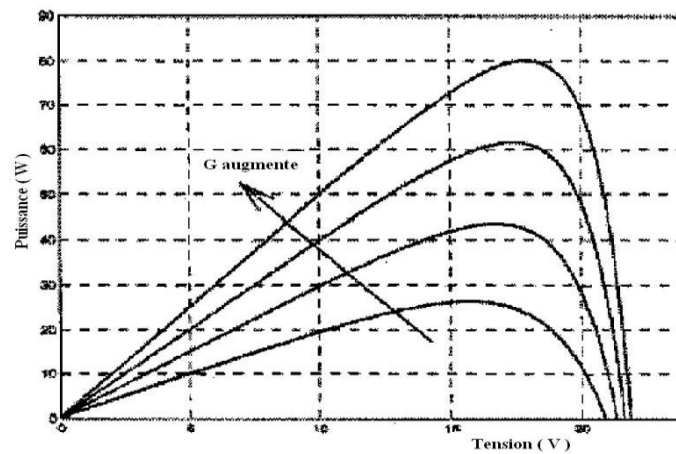


Figure 2.6: Caractéristique P-V en fonction de l'éclairement

2.2.6.2 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement d'un module PV. Nous constatons à la figure (2.7), qui représente la caractéristique I-V pour un éclairement constant et pour diverses valeurs de la température, que le courant de court circuit I_{cc} varie peu en fonction de température. Par contre, l'augmentation de la température engendre une diminution de la tension en circuit ouvert et se traduit aussi par une diminution de la Puissance maximale disponible dans les modules PV (figure 2.8). D'ou l'influence de la température sur le comportement du module PV [8].

La tension à vide d'un module PV en fonction de la température et de l'éclairement est donnée par la relation suivante:

$$V_{co} = V_{co}^* + \alpha_2 (T - T^*) - (i_{cc} - i_{cc}^*) R_s \quad (2.10)$$

V_{co}^* et i_{cc}^* représentent respectivement la tension en circuit ouvert et le courant de court-circuit à $T = 25\text{ °C}$ et $G = 1\text{ kW/m}^2$. α_2 est le coefficient obtenu empiriquement.

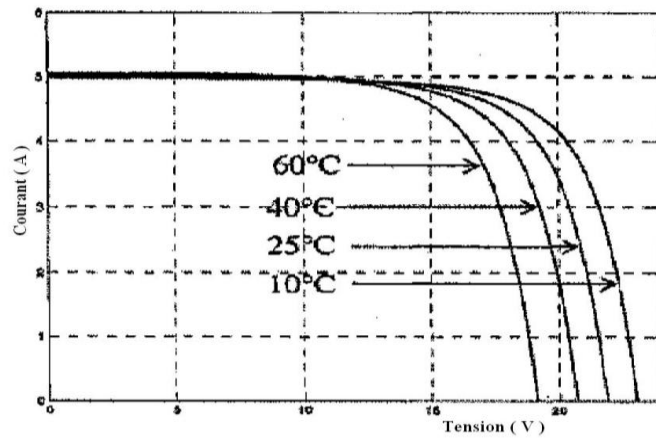


Figure 2.7: Caractéristique I-V en fonction de la température

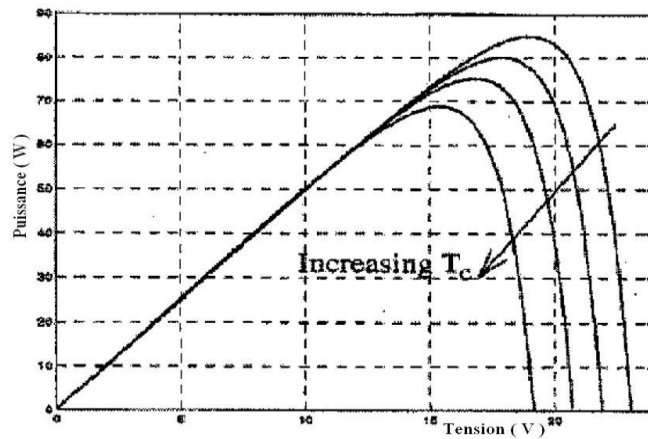


Figure 2.8: Caractéristique P-V en fonction de la température

2.2.7 Design d'un système photovoltaïque [3]

Dû à la nature variable de la source d'énergie, un des aspects les plus chers d'un générateur photovoltaïque est la nécessité de réaliser, dans l'autonomie du système, la fourniture d'énergie pendant des périodes de mauvais temps ou à des augmentations de demandes. Cela est accompli par un sur-dimensionnement de la taille des générateurs et agrandir le stockage de la batterie, les deux composants du système étant les plus chers. C'est aussi nécessaire de considérer la fraction de la sortie du réseau pour compenser les pertes et de fournir les frais nécessaires "périodiques" qui prennent généralement la forme d'un surcoût mesuré.

Les batteries peuvent stocker l'énergie PV pour une utilisation ultérieure, mais cette capacité de stockage d'énergie est associée avec des pertes d'efficacité pendant le processus de déchargement de charge.

2.2.8 Photovoltaïque dans les systèmes hybrides [3]

Dans un système hybride, la partie photovoltaïque peut être utilisée comme chargeur d'énergie au parc de batterie avec un taux de charge lent.

2.3 Aérogénérateur

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure 2.9).

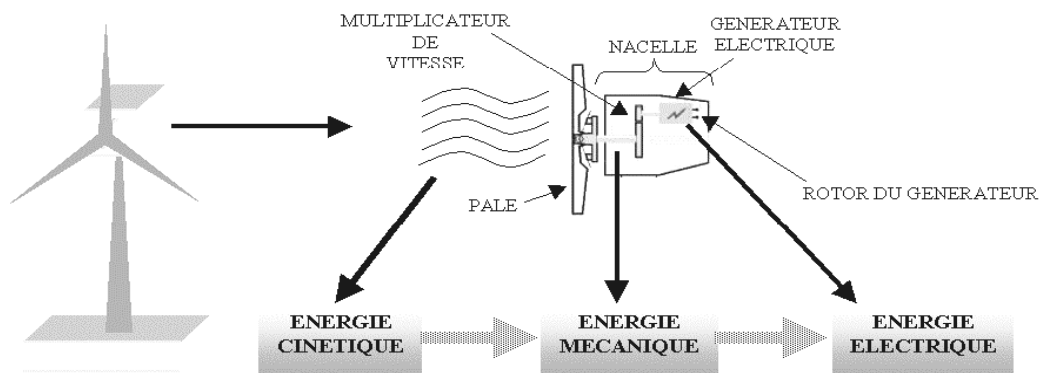


Figure 2.9: Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [5].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre, mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est

implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. En effet, selon l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), le niveau sonore d'une éolienne est de 50 dB à 150 mètres et devient imperceptible au delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. Les éoliennes sont groupées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- Eoliennes de petite puissance: inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance: de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance: supérieure à 1 MW.

2.3.1 Puissance récupérable par une turbine

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

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.11)$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface A , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait, alors:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.12)$$

où ρ est la masse volumique de l'air.

Cependant, le dispositif de conversion extrait une puissance P_e inférieure à la puissance incidente P_v , à cause de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur. On définit alors, le coefficient de puissance de l'aéromoteur par la relation:

$$C_p = \frac{P_e}{P_v} \quad C_p < 1 \quad (2.13)$$

Ce coefficient caractérise l'aptitude de l'aérogénérateur à capter de l'énergie éolienne. La puissance correspondante est donc donnée par:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho \pi . R^2 . C_p . v^3 \quad (2.14)$$

où R est le rayon de l'hélice.

On peut estimer la valeur maximale de ce coefficient, donc la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne, en s'appuyant sur la théorie Rankine – Froude de l'hélice dans un fluide incompressible. C'est la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée 'limite de Betz' du coefficient de puissance:

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (2.15)$$

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (2.16)$$

avec:
$$\lambda = \frac{R \Omega}{v}$$

Où Ω est la vitesse angulaire de la turbine et R le rayon de la turbine.

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

On peut définir la notion de rendement aérodynamique de l'éolienne par le rapport:

$$\eta_a = \frac{C_p}{C_p^{\max}} = \frac{C_p}{0.593} \quad (2.17)$$

qui est représentatif de la 'qualité aérodynamique' de l'éolienne.

2.3.2 Caractéristiques des turbines éoliennes

Dans la technologie concernant les dispositifs de conversion d'énergie éolienne, il existe deux grandes catégories d'éoliennes, qui se réfèrent à la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice (Figure 2.10).

- Turbines à axe horizontal
- Turbines à axe vertical

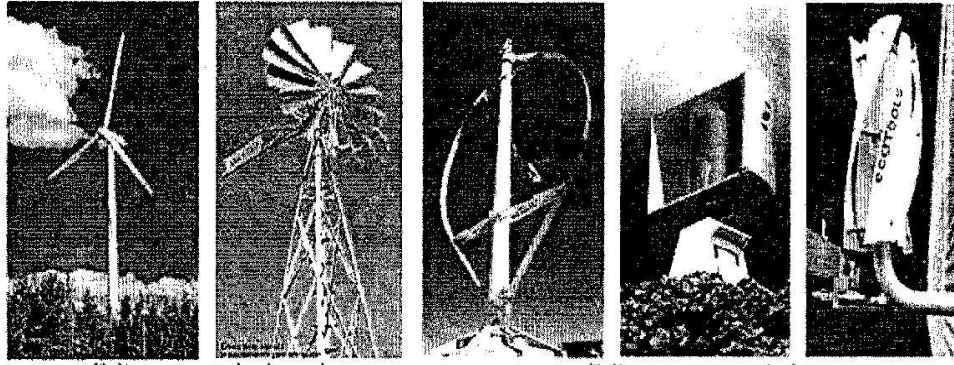


Figure 2.10: Différent types de turbines éoliennes (axe horizontal et axe vertical)

2.3.2.1 Turbines à axe vertical

Les turbines à axe vertical sont très peu répandues et assez mal connues. Le rotor de ce type de turbine fonctionne à l'aide de la portance, il se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Le couple résistant au démarrage de ce type d'éoliennes est proche de zéro [9] ce qui constitue un avantage.

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

2.3.2.2 Turbines à axe horizontal

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal, Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pâles (les plus courantes) et les multi pâles. La caractéristique de puissance C_p dépend principalement du nombre de pales utilisé.

La Figure 2.11 montre l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal avec 1, 2, 3 et 4 pâles [9]. On remarque que pour chaque type d'éolienne correspond une vitesse normalisée, λ_{opt} , qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique $C_p(\lambda)$ sera en cloche, plus il sera

bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale.

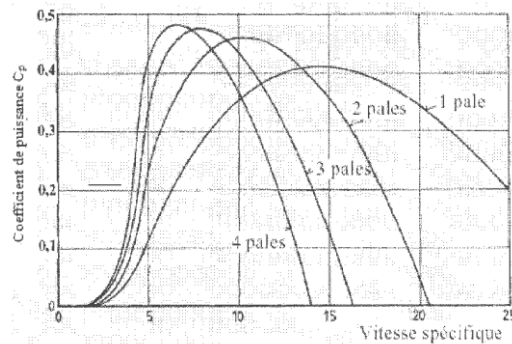


Figure 2.11: Coefficient de puissance en fonction de la vitesse de rotation

2.3.3 Production optimale d'énergie

La Figure 2.12 donne la courbe de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale P_n . Cette puissance est obtenue à partir d'une vitesse du vent V_n , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

A côté de la vitesse nominale V_n , on spécifie aussi:

- la vitesse de démarrage V_D , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie,
- la vitesse maximale du vent V_M , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses V_n , V_D et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent:

- la zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas),
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v ,
- la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste sensiblement égale à P_n ,
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

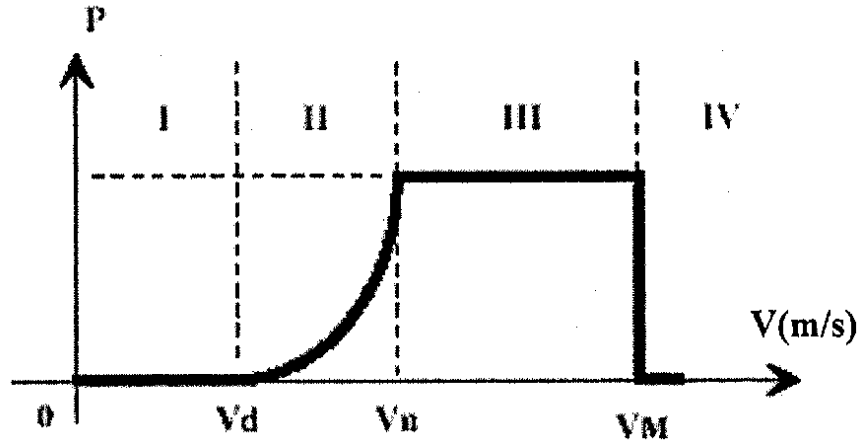


Figure.2.12: Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

Une régulation est utilisée pour assurer la sécurité de l'éolienne et limiter la puissance par vents forts. Il existe quatre voies principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs de la vitesse du vent. La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable 'pitch', elle est donc plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelques centaines de kW). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure.

La seconde technique est passive, 'stall'. Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons des deux technologies précédemment citées.

La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (rotation autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue.

La dernière famille qui permet la régulation de la puissance éolienne consiste à faire varier la vitesse de rotation par une action électrique. Par le biais de la génératrice accouplée à une chaîne de conversion statique pilotée pour gérer le transfert d'énergie, la vitesse de rotation peut être pilotée selon le point de fonctionnement souhaité. Le plus souvent, dans les turbines classiques à axe horizontal, le dispositif de réglage à fréquence variable est associé à un réglage mécanique (pitch ou stall) [9].

2.4 Générateur électrogène

Il existe plusieurs types de générateurs fonctionnant avec une variété de combustibles, y compris gas oil, essence, propane et combustibles bio. Comparé aux installations d'énergie renouvelables, ces générateurs ont des coûts assez bas en investissement, produisent une énergie électrique selon la demande.

Les inconvénients d'opération du générateur incluent la dépendance du carburant, le transport, le stockage coûte cher, et l'exposition au bruit [3].

2.4.1 Générateur diesel dans un système hybride

L'intégration de sources d'énergie renouvelable dans un système diesel est loin d'être simple, surtout lorsque les sources d'énergie renouvelables sont supposées avoir une grande contribution.

2.5 Stockage d'énergie

2.5.1 Électricité de la batterie

Les batteries sont des systèmes électrochimiques qui stockent de l'énergie sous forme chimique. Elles sont utilisées pour entreposer l'énergie en excès pour un usage plus tardif. La plupart des batteries utilisées dans les systèmes hybrides sont du type à 'cycle profond' au plomb acide. Il y a plusieurs autres systèmes de stockage appropriés (nickel-cadmium, nickel-fer, fer-air et sodium soufre), mais ils sont généralement trop onéreux ou trop peu fiable pour une application pratique, comme la plupart d'entre eux reste encore au point de vue expérimentale.

La batterie a plomb acide a un rôle principal, l'acide est largement utilisée et bien que complexe, sa limitation majeure est qu'elle doit être exploitée dans les limites strictes et comme c'est susceptible sous certaines conditions, telles que la surcharge et la sous-charge.

Les coûts de la batterie peuvent former une partie mineure des coûts du système initiale mais, sous conditions défavorable, l'entretien de la batterie et son remplacement peuvent prendre une portion considérable des coûts du cycle de vie du système et peuvent montrer une complexité à long terme d'utilisation. Cependant, si les conditions du fonctionnement sont favorables, ces batteries peuvent durer 15 années d'utilisation autonome. Les batteries individuelles utilisées dans l'énergie renouvelable et systèmes hybrides sont disponibles dans des capacités d'une fourchette allant de 0.5 kWh à plusieurs kWh.

2.5.2 Principe de fonctionnement

2.5.2.1 Capacités du stockage

La capacité du stockage de la batterie est donnée en ampèreheures (Ah) généralement ou après multiplication avec le voltage nominal de la batterie (kWh). La valeur pour la capacité du stockage dépend de son opération, l'âge et le traitement. La capacité du stockage augmente, quand les taux de la charge et de la décharge sont lents. La plupart des fabricants des batteries donnent la capacité du stockage pour un temps de décharge donné, habituellement 20 ou 100 heures [3].

2.5.3 Dessin

Souvent les batteries du type plomb acide sont choisies. En général ces batteries sont plus coûteuses et plus efficace que les batteries Nicad [3].

Le nombre de batterie qui peut être connectée en parallèle est limité, il est égale approximativement à cinq. Cela veut dire qu'une fois la capacité de la banque de batterie générale sélectionnée le type de batterie individuel doit être choisi en conséquence [3].

2.5.4 Installation

Les batteries devraient être installées dans un endroit aéré et clos. Les batteries peuvent être connectées en série pour augmenter la banque de voltage et en parallèle pour augmenter la capacité [3].

2.5.5 Batteries dans un système hybride

Le fonctionnement de la batterie dans un système hybride par opposition à une source seule peut résulter certains avantages, en ce qui concerne l'optimisation de la vie de la batterie.

Cela exige un meilleur règlement de composants et résultera un meilleur traitement de la batterie. Les batteries sont chères et peuvent être classées selon la grosseur souvent plus petite dans un système hybride que dans un système à source seule.

2.6 Appareils de conversion

Les convertisseurs de puissance sont utilisés pour convertir la puissance DC en AC qui est exigé par la plupart des appareils électriques et vice versa.

2.6.1 Convertisseur

Quand les appareils AC sont utilisés, un convertisseur doit être installé entre le parc de stockage des batteries et le sous-système [3]. Le convertisseur est normalement d'une seule phase pour des faibles estimations de la puissance. Les convertisseurs triphasés sont plus onéreux qu'un convertisseur monophasé.

2.7 Conclusion

L'objet de ce chapitre consiste en une description des divers équipements entrant dans un système hybride de production d'énergie électrique et de leur fonctionnement. Il est à noter que la notion de système hybride se rapporte à l'utilisation de deux ou trois sources d'énergie renouvelables, comme par exemple le photovoltaïque avec l'éolien, le photovoltaïque avec l'éolien et le groupe diesel, le photovoltaïque avec le groupe diesel, et aussi sans oublier le stockage d'énergie.

Chapitre 3

Dimensionnement d'un système hybride sur divers sites d'implantation

3.1 Introduction

L'objet de ce chapitre consiste en une étude technique, une analyse économique et le dimensionnement des systèmes multi sources de production d'électricité d'origine renouvelable (PV, Eolien, Diesel) ou un nombre de sources d'énergie renouvelable (vent, soleil,..), de générateur diesel et de composant de stockage d'énergie sont combinés pour remplir la demande d'énergie d'une charge. Il peut exister plusieurs types de combinaisons de ces générateurs d'électricité, à savoir: 'PV / Diesel', 'Eolien / Diesel', 'PV / Eolien', 'PV / Eolien / Diesel'. En plus de ces systèmes hybrides, il existe le système purement photovoltaïque et le système purement éolien.

Ces différents systèmes doivent alimenter en énergie électrique, un village composé d'une dizaine d'habitations, de type individuel et peut être situé sur trois sites isolés dans différentes régions du sud algérien, représentées par Ghardaïa, Adrar et Tamanrasset.

La conception de ces systèmes hybrides devrait toujours chercher à optimiser l'utilisation des ressources locales et à minimiser celle des combustibles fossiles, afin de réduire au maximum les coûts de fonctionnement en tenant compte de la taille du système.

En général, l'énergie photovoltaïque se prêterait mieux aux petites charges, tandis que l'énergie éolienne, lorsqu'elle peut être exploitée, serait rentable pour alimenter de grandes charges. La conception et la mise en œuvre d'un système fiable et efficace exigent une évaluation complète de ressources et une analyse des besoins en énergie.

Cette étude est effectuée, en utilisant le logiciel intitulé: **Homer**, '**Hybride Optimisation Model for Electric Renewable**'. Avant de l'utiliser pour l'optimisation de tels systèmes hybrides et cela pour un site d'implantation adéquat, il est important d'effectuer une description, voire un aperçu sur ce logiciel '**Homer**', de prendre connaissance de la demande électrique, et surtout de connaître les autres ressources énergétiques disponibles sur ce site d'implantation.

3.2 Problématique de l'optimisation

Dans les sites isolés ou éloignés des réseaux de distribution électrique, le coût de transport du carburant pour une génératrice constitue en général l'une des charges financières, la plus élevée pour les groupes électrogènes. Le système hybride devrait donc intégrer la nécessité de réduire les coûts de fonctionnement, d'où une planification adéquate pour une utilisation optimale des diverses sources d'énergie disponibles. Pour les systèmes PV et les systèmes éoliens, la source d'énergie étant gratuite, les coûts de fonctionnement infimes sont contrecarrés par un investissement initial assez élevé pour couvrir l'acquisition et l'installation des équipements. Le système hybride devrait donc permettre d'utiliser au maximum les ressources solaires et éoliennes, tout en minimisant les coûts d'approvisionnement en carburant pour la génératrice diesel.

3.3 Analyse économique

Toute étude de dimensionnement d'installations photovoltaïque, éolienne ou hybride (photovoltaïque, éolienne et diesel) doit être menée de manière à approcher au mieux la solution optimale du compromis: coût - satisfaction des besoins énergétiques. La méthode d'analyse suggérée dans le cadre de ce projet est celle du coût global sur le cycle de vie (Life Cycle Cost).

Il y a de bonnes raisons de croire que le coût des énergies conventionnelles va augmenter dans les décennies à venir. Partout à travers le monde, le taux de découverte des nouvelles réserves de pétrole est en déclin, tandis qu'en même temps la demande énergétique augmente. Les réserves conventionnelles restantes, bien que vastes, sont concentrées dans un petit nombre de pays. Les technologies d'énergies renouvelables ont généralement un coût d'investissement supérieur (c'est-à-dire, les coûts initiaux du projet) vis-à-vis des technologies conventionnelles concurrentes. Ceux-ci ont conduit certaines personnes à la conclusion que les technologies d'énergies renouvelables sont trop dispendieuses et très onéreuses.

Malheureusement, ce point de vue ignore les coûts réels induits par l'exploitation et l'entretien de l'ensemble des systèmes énergétiques, peu importe qu'ils soient renouvelables ou conventionnels. Les technologies d'énergies renouvelables ont généralement des coûts d'exploitation inférieurs à ceux des technologies conventionnelles. Alors, comment les coûts d'investissement élevés et les coûts d'exploitation faibles des technologies d'énergies propres peuvent-ils se comparer aux coûts d'investissement faibles et coûts d'exploitation élevés des technologies conventionnelles ?

La réponse consiste à considérer tous les coûts sur toute la durée de vie d'un projet. Ceux-ci incluent non seulement les coûts initiaux (analyse de faisabilité, ingénierie, développement, achat d'équipements et installation), mais également: ♦ les coûts annuels pour le combustible, l'exploitation et l'entretien; ♦ les coûts pour les remises en état majeur et les remplacements d'équipements; ♦ les coûts pour le démantèlement du projet (pouvant être relativement élevés pour les technologies qui polluent un site); et ♦ les coûts de financement du projet, comme les frais d'intérêt.

L'ensemble de ces coûts doit être additionné, en prenant en compte la valeur temporelle de l'argent, pour déterminer tous les coûts du « Cycle de Vie » d'un projet.

Malgré leurs coûts d'investissement plus élevés, elles sont souvent rentables vis-à-vis des Technologies conventionnelles, lorsqu'elles sont comparées sur la base du coût sur le cycle de vie.

Les principaux coûts financiers en investissement qui sont liés à la réalisation et l'installation d'un système hybride peuvent être décomposés selon certaines rubriques à savoir: ♦ Coût relatif aux études de conception. ♦ Coût relatif aux équipements solaires et éoliens (modules photovoltaïques, aérogénérateurs, régulateurs de charge et de contrôle, onduleurs, éléments de batterie, diverses fournitures). ♦ Coût de l'installation du système sur site. ♦ Coût des travaux de génie civil. ♦ Installation et mise en fonctionnement de la centrale.

3.3.1 Coût d'un système multi source (photovoltaïque, éolien, diesel)

Le calcul du coût d'un tel système requiert la connaissance des éléments suivants:

- La durée de vie.
- L'investissement initial.
- Les coûts de maintenance annuels relatifs aux systèmes (photovoltaïque, éolien, diesel).
- Les coûts de remplacements des différents sous-systèmes.
- Les profits réalisés.

3.3.2 Investissement initial

L'investissement est défini comme étant le prix de tous les moyens de production et de réalisation de l'installation, à savoir:

- Etudes.
- Matériels et équipements.

- Transport.
- Terrains.
- Réalisation.

L'investissement initial permet à l'utilisateur de savoir quel est le prix qu'il va devoir payer lors de l'installation du système.

3.3.3 Coût actualisé net total

Le coût actualisé net total est calculé à partir de l'équation suivante:

$$CAN = \frac{C_{ann,tot}}{Fa(i, N)}$$

Où: $C_{ann,tot}$: Coût annuel total; Fa : Facteur d'actualisation; i : Taux d'intérêt; N : Durée de vie du système.

$$Fa(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}$$

Le coût annuel total est la somme des coûts annuels de chaque composant du système. La somme est représentée par:

- Le coût annuel du capital d'investissement;
- Le coût annuel de remplacement des composants du système;
- Le coût annuel du carburant.

3.3.4 Coût actualisé d'énergie

Le coût actualisé de l'énergie est défini comme étant le coût moyen par kWh de l'énergie électrique utile produite par le système. Le calcul du coût actualisé du système consiste à convertir des valeurs futures en unités monétaires d'aujourd'hui. C'est une opération nécessaire pour rendre comparable deux valeurs actuelle et future.

Pour évaluer le coût global actualisé du kWh, il est nécessaire d'avoir certaines données:

- La durée de vie.
- Le coût ou l'investissement initial.
- Les coûts de maintenance annuels relatifs au système.
- Le coût de remplacement des différents sous-systèmes.

Le coût actualisé d'énergie est donné par l'équation suivante:

$$CAE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{utile,produite}}$$

3.4 Aperçu sur le logiciel Homer

3.4.1 Introduction de Homer

Homer pour Hybrid Optimization Model for Electric Renewable est un logiciel élaboré pour la connaissance de l'architecture la plus rentable et pour une gestion optimisée de l'ensemble des équipements appropriés pour une production électrique, pouvant être soit conventionnel ou renouvelable, nécessaire pour alimenter une charge très particulière, et pour donner des ressources très particulières en terme de données des équipements.

Homer offre plusieurs avantages par rapport à d'autres modèles disponibles, faisant un travail identique.

Premièrement, ce logiciel a un palmarès bien établi. **Homer** a été développé par le Laboratoire National de l'Energie Renouvelable en 1993, et il a subi depuis, une révision et un développement continus.

Deuxièmement, **Homer** est capable de contrôler la portée des systèmes qui nous intéressent. Plusieurs progiciels de simulation sont limités à une seule technologie particulière. Troisièmement, **Homer** est un modèle d'optimisation. Beaucoup de modèles détaillés sont disponibles pour la simulation, mais pas pour l'optimisation des systèmes hybrides.

De plus, les modèles les plus détaillés prennent un temps considérable pour effectuer les simulations contrairement à HOMER.

3.4.2 Simulation, optimisation et sensibilité des analyses de Homer

Homer est un modèle d'optimisation. Il utilise une approche modifiée d'énumération complète pour déterminer la solution la plus rentable.

Homer exécute un équilibre d'énergie en comparant la demande d'électricité dans chaque bus en une heure à l'énergie électrique disponible dans ce bus pour arriver à cette demande. C'est-à-dire, la demande du courant alternatif (AC Power) rejoint le courant alternatif, la demande du courant continu (DC Power) rejoint le courant continu, et l'excès de charge est stocké, avec une charge ayant été convertie du courant alternatif au courant continu, ou du courant continu au courant alternatif, suivant la nécessité.

L'énergie peut être limitée par la capacité du convertisseur de déplacer l'énergie du bus où il a été généré au bus où il est nécessaire.

Une simulation est complète une fois qu'**Homer** exécute cet équilibre d'énergie à chaque heure dans l'année. Alors, **Homer** répétera ce processus pour chaque combinaison de composants, Il va les classer par rapport à leur coût actuel net, avec la solution la plus optimale (Coût Actuel Net le plus bas) qui apparaît en premier.

Une analyse de sensibilité peut être exécutée sur plusieurs variables dans le logiciel **Homer**. L'utilisateur peut choisir plus d'une seule valeur à être considéré pour n'importe quelle variable de sensibilité. Les variables de sensibilité diffèrent des variables de décisions; les variables de sensibilité ne sont pas optimisées comme le sont les variables de décision; et les variables de décision sont en général sous le contrôle du concepteur de projet, alors que les variables de sensibilité ne le sont pas.

La taille du générateur à installer, par exemple, est une variable de décision. Un concepteur de système peut faire entrer de multiples tailles de générateur, **Homer** rapportera la solution optimale (petit prix ou petit coût) pour la taille spécifiée du générateur.

Cependant, le coût du diesel est une variable de sensibilité, le planificateur de système n'a aucun contrôle sur lui.

3.4.3 Architecture

On peut schématiser l'architecture de simulation de logiciel dans la figure suivante :

Le bloc des grandeurs d'entrée englobe les données de la charge, les ressources météorologiques locales du site et les équipements qui constituent le système hybride.

Les résultats techniques mettent en évidence l'évaluation énergétique du système optimal en calculant la fraction d'énergie renouvelable et la consommation de carburant.

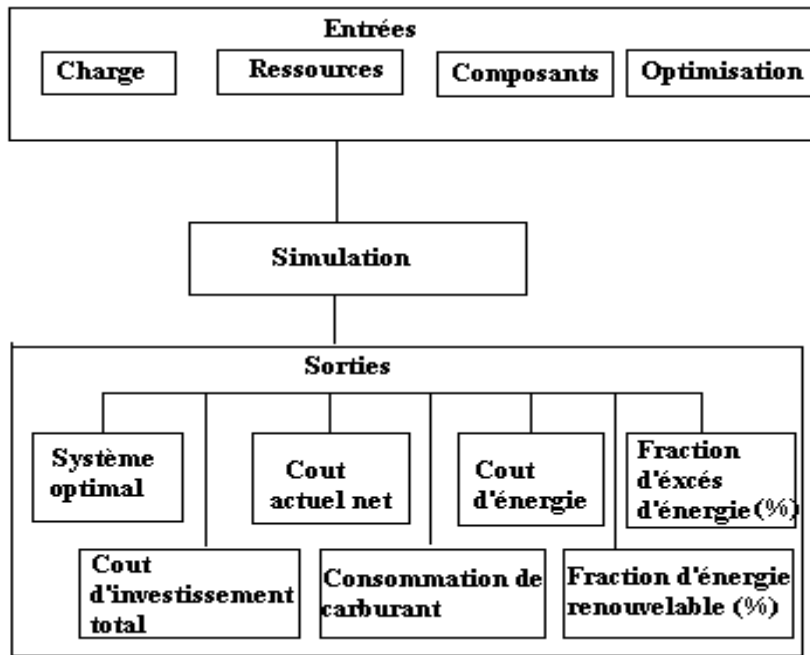


Figure 3.1: Architecture de simulation

3.4.4 Dispatching du système

La sortie de ces composants non envoyés est calculée sur la base des ressources d'entrée. L'énergie disponible dans chaque bus est comparée à la demande de chaque bus.

S'il ya un excédent d'énergie dans un bus, il sera transféré via le convertisseur pour satisfaire la demande d'un autre bus. Si l'énergie non envoyées dépasse la demande, l'excès sera ajouté à la batterie. La batterie est simulée en utilisant la batterie cinétique. Elle possède deux 'réservoirs' d'énergie. Un réservoir qui contient l'énergie 'valable', qui est immédiatement disponible au DC bus. L'autre réservoir contient l'énergie 'liée', qui n'est pas immédiatement disponible. Le taux auquel l'énergie peut être transférée d'un réservoir à un autre est défini par un taux constant lié.

3.4.5 Analyse rentable

L'analyse détaillée est indispensable pour pouvoir comparer le coût d'un système hybride par rapport à un autre. Par exemple, les systèmes photovoltaïques, ont des frais très élevés, mais durent longtemps, et elles nécessitent peu de maintenance. D'un autre côté, les générateurs thermiques à essence, sont relativement peu chers à acquérir, mais ont des frais d'exploitation élevés, et nécessitent un achat continu en essence, et doit être remplacer ou réviser régulièrement.

La mesure rentable appropriée pour comparer le vrai coût des systèmes avec des prix de composants différents est le Coût Actuel Net (CAN). Le CAN, est le coût total du système, en

incluant les coûts initiaux, les coûts d'exploitation et les coûts des équipements de remplacement sur la durée de vie du projet. Cette valeur est fonction de la durée de vie du projet et le vrai taux d'intérêt annuel, défini par l'utilisateur.

Une autre mesure rentable utile à comparer entre les systèmes, c'est la Quantité du coût d'énergie (COE). Ce résultat montre que le coût moyen de l'énergie produite par le système, y compris tous les coûts fixes et variables, s'effectue en dollars par kilowatt/heure. Cette mesure peut être particulièrement utile, lorsqu'on compare le coût de l'installation électrique dans un village de manière indépendante par rapport au coût du courant.

3.5 Grandeurs d'entrées de Homer

3.5.1 Exigences

Homer exige quatre types de grandeurs d'entrées. Le premier type s'apparente aux chargements des données. Si un chargement est connu, **Homer** peut utiliser 8760 heures moyennes de valeurs, représentant chaque heure dans une année. Si le niveau de détail n'est pas connu, **Homer** peut simuler une charge à une heure basée sur un profil d'un jour typique. Au minimum, l'utilisateur doit faire entrer vingt quatre heures de valeurs et la charge moyenne quotidienne pour l'année. L'utilisateur peut donc faire entrer aussi une grandeur statistique journalière et horaire, à ajouter au chargement (ou accepter les valeurs par défaut d'**Homer**), pour représenter une forme de chargement plus réaliste. Un seul jour typique peut être entré pour représenter toute l'année, ou une autre forme peut être entrée pour différents mois ou saisons. La forme utilisée pour les weekends (samedi et dimanche) peut être différente du jour typique de la semaine, soit pour l'année entière ou à base de saisons ou des mois.

3.5.2 Composants

Un *composant* dans **Homer** est une pièce d'équipement utilisée pour produire, sauvegarder ou transférer de l'énergie. Les génératrices diesel et les systèmes photovoltaïques sont des exemples évidents des composants. Les électrolyseurs à hydrogène et les connections à quadrillage sont des exemples moins évidents. Les détails techniques nécessaires comprennent la durée de vie du composant, la force des turbines à air, l'azimut et la pente du tableau photovoltaïque, et autres détails similaires.

Dans une stratégie d'envoi de charge de suivie, un générateur au combustible fossile fonctionne, lorsque le besoin est ressenti à la moindre demande ou à sa charge minimum.

Il n'y a pas de valeurs par défauts dans **Homer** pour les coûts des composants. Les coûts d'informations requises incluent le coût capital initial de n'importe quel composant.

Le coût pour remplacer un composant à la fin de sa durée de vie peut différer considérablement du coût capital initial,

3.5.3 Grandeurs d'entrées sensibles

Les deux entrées sensibles principales sont le projet à vie et le vrai taux d'intérêt annuel. Le projet à vie c'est la période sur laquelle le cout net actuel et autres sorties rentables sont calculés.

Le vrai taux d'intérêt annuel est le vrai taux auquel l'utilisateur s'attend que le projet soit financé. C'est l'une des entrées les plus difficiles pour la plupart des utilisateurs.

3.6 Etapes de conception du système hybride

1. Définir les ressources climatiques du site : ensoleillement, vent et température.
2. Estimer la charge moyenne en Ah/j.
3. Dimensionner la batterie : capacité Ah.
4. Dimensionner le champ photovoltaïque : puissance crête en Wc.
5. Choisir le système hybride qui est approprié.
6. Recalculer les caractéristiques des composants: PV, Batteries, aérogénérateurs, Génératrice, Onduleur, Chargeur

3.7 Sites d'implantation

Les sites choisis appartiennent à des zones dans le sud du pays. Dans notre cas, nous avons choisi les trois sites suivants, à savoir:

- Site de Tamanrasset
- Site de Ghardaïa
- Site d'Adrar

Le choix de ces sites est basé sur la disponibilité des données météorologiques. Les caractéristiques géographiques des trois sites sont présentées sur le tableau suivant.

Site	Latitude	Longitude	Altitude
Tamanrasset	22.8N	5.51E	1364m
Ghardaïa	32.40N	3.80 E	450 m
Adrar	27.82N	00.18W	263m

Tableau 3.1: Caractéristiques géographiques des trois sites

3.8 Homer®

Le logiciel **Homer** est utilisé pour déterminer les dimensions de chaque équipement composant le système hybride. Les données principales d'entrée du programme sont:

- Les coordonnées géographiques du site.
- Les données de consommation, heure par heure de la charge pendant toute l'année.
- Les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire sur un plan horizontal et de la vitesse du vent journalière ainsi que les caractéristiques géographiques de chaque site.
- Les capacités et le nombre de chaque élément du système hybride (Champ PV, Aérogénérateur, Générateur Diesel, Onduleur, le stockage).
- Les coûts de référence de chaque élément du système hybride.

3.9 Données météorologiques

	Adrar Lat: 27.88 Long: 0.28 Alt: 263			Ghardaïa Lat: 32.4 Long: 3.81 Alt: 450			Taman. Lat: 22.8 Long: 5.51E Alt: 1364		
	Vitesse vent	Radiation solaire	Temp.	Vitesse vent	Radiation solaire	Temp.	Vitesse vent	Radiation solaire	Temp.
Jan	7.05	4.131	21.1	2.47	3.431	10.6	3.36	4.787	12.9
Fév	7.83	4.131	16.2	2.36	3.431	12.8	3.58	4.787	15.4
Mar	6.94	5.074	19.5	4.41	4.444	15.8	4.25	5.700	19.3
Avr	8.88	6.078	24.1	5.02	5.354	20.1	4.36	6.492	22.4
Mai	7.30	7.012	28.8	4.94	6.632	24.7	4.61	7.039	26.5
Jui	6.97	7.385	34.5	4.44	6.995	30.3	3.97	7.125	29.2
Juil	6.66	7.406	32.6	3.55	7.378	33.4	4.58	7.133	28.3
Ao	7.16	7.024	36.1	2.8	7.242	32.7	4.11	7.271	28.4
Sep	5.94	6.598	31.9	3.5	6.633	27.9	3.94	7.152	26.8
Oct	6.91	6.252	24.9	3.69	5.989	21.4	3.97	6.526	22.6
No	6.88	5.183	18.4	3.33	4.553	15	3.22	5.862	17.7
Dec	6.19	4.339	12.7	3.25	3.543	11.1	2.88	5.038	13.8

Tableau 3.2: Table représentant les données météorologiques des trois sites

Les sites de Ghardaïa et Adrar sont situés respectivement au Nord et au Nord-Ouest du Sahara Algérien et possèdent un potentiel solaire important, avec une moyenne mensuelle du rayonnement quotidien sur l'horizontale variant entre 3.5 kWh/m²/j (Décembre) et 7.89 kWh/m²/j (Juin et Juillet) pour Ghardaïa et entre 3.83 kWh/m²/j (Décembre) et 8.14 kWh/m²/j (Juin) pour Adrar, et avec des moyennes annuelles de 5.41 kWh/m²/j et 6.24 kWh/m²/j respectivement.

La température moyenne maximale, par mois, est de 32.7 °C (Juillet) pour Ghardaïa et de 36.1 °C pour Adrar, tandis que la température moyenne minimale est de 10.9 °C (Janvier) pour Ghardaïa et 12.7 °C (Décembre) pour Adrar. Sur les figures 3.2 à 3.7, sont présentées les données météorologiques des trois sites. Ces données sont tirées du logiciel ‘Météonorm’.

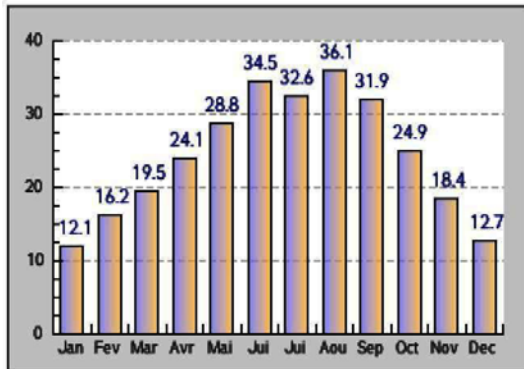


Figure 3.2: Températures moyennes Adrar

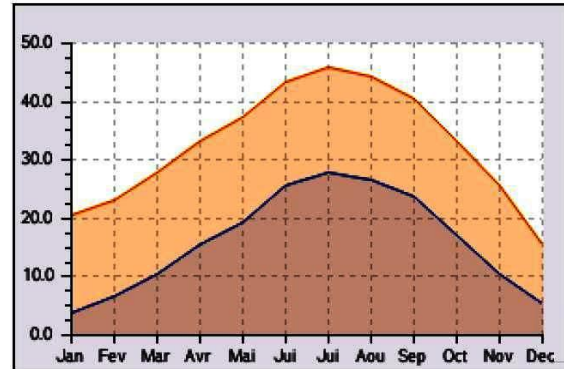


Figure 3.3: Température minimum et maximum – Adrar

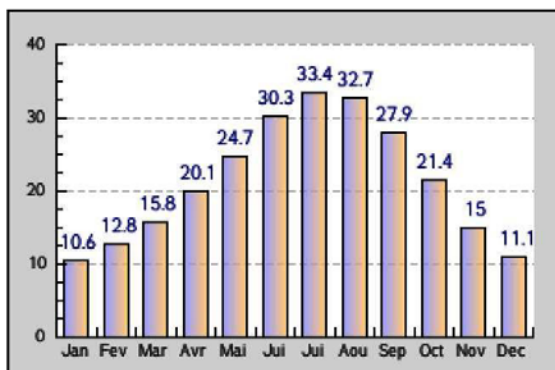


Figure 3.4: Températures moyennes Ghardaïa

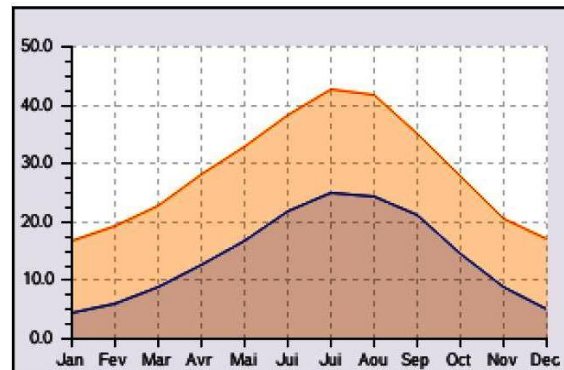


Figure 3.5: Température minimum et maximum – Ghardaïa

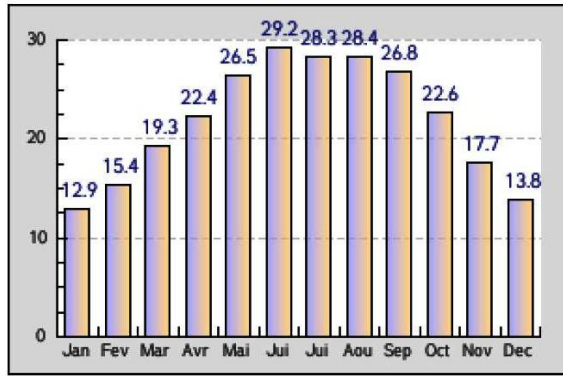


Figure 3.6: Températures moyennes Tamanrasset

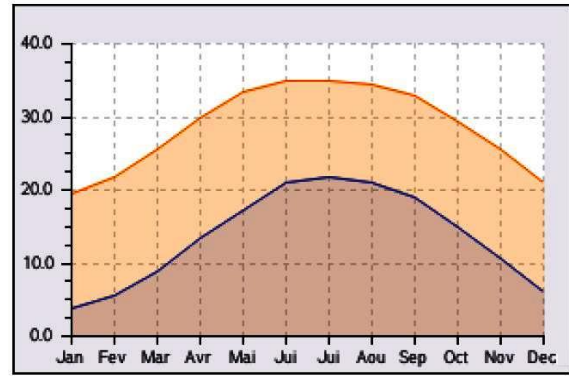


Figure 3.7: Température minimum et maximum – Tamanrasset

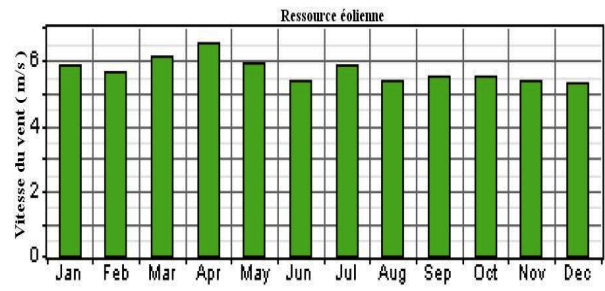
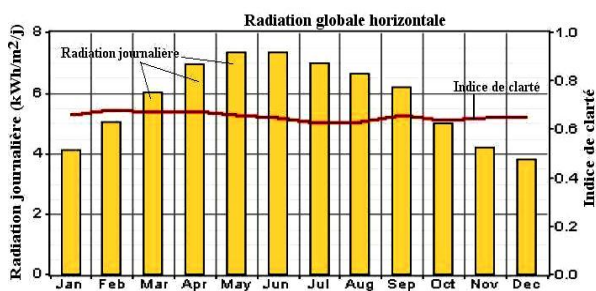


Figure 3.8: Données de radiation et de vitesse du vent – Adrar

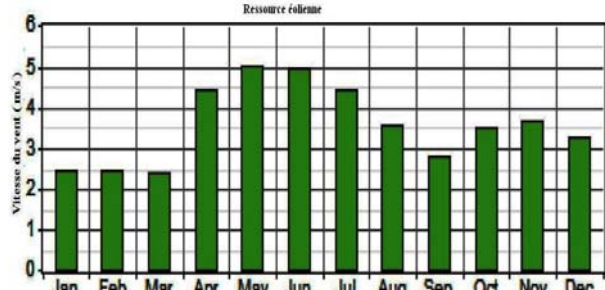
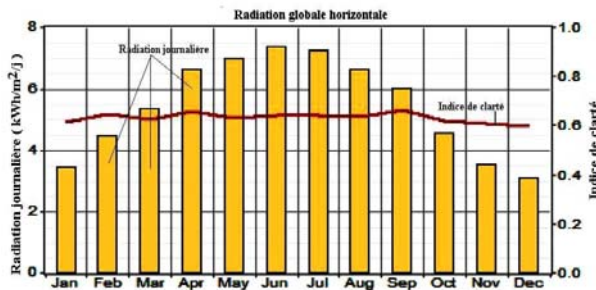


Figure 3.9: Données de radiation et de vitesse du vent - Ghardaïa

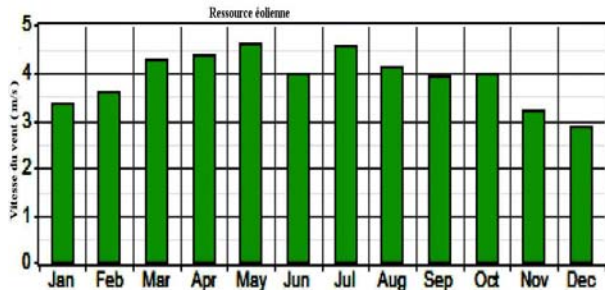
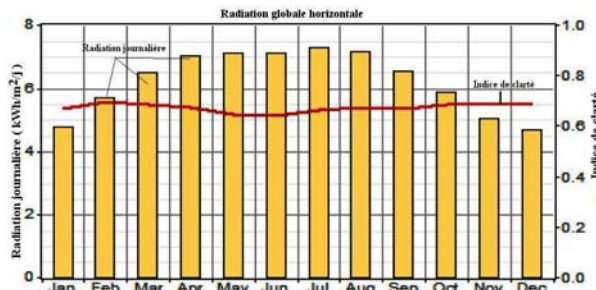


Figure 3.10: Données de radiation et de vitesse du vent – Tamanrasset

Tamanrasset, une vaste terre aride, au milieu du Sahara algérien, un territoire plus grand que celui de la France. Sa superficie est de 619360 km² avec 192 684 habitants.

La température moyenne mensuelle maximale est de 29,2 °C, au mois d'août, tandis que la température moyenne minimale est de 12,9 °C au mois de Janvier, avec une température moyenne annuelle de 18,2 °C.

Mesuré sur une surface horizontale, le rayonnement solaire quotidien varie entre 1,69 kWh/m²/j au mois de décembre, et il est égal à 6,43 kWh/m²/j au mois de Juin, avec une moyenne annuelle de 4,168 kWh/m²/j.

3.10 Caractéristiques complémentaires

Comme la montre les figures 3.11, 3.12 et 3.13, l'énergie solaire et éolienne permettent de compenser l'ensemble de la demande d'énergie, et cela pendant plus d'une année. L'énergie éolienne est propice en période hivernale, alors que l'énergie solaire est plus faible en même période.

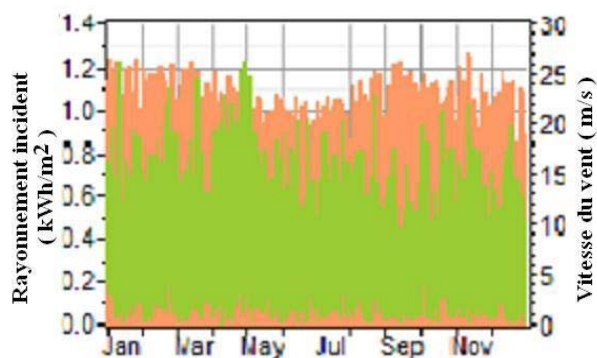


Figure 3.11: Données mensuelles – Radiation solaire et Vitesse de vent (Site Tamanrasset)

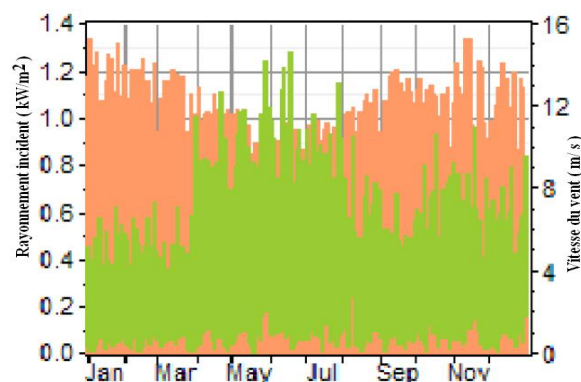


Figure 3.12: Données mensuelles – Radiation solaire et Vitesse de vent (Site Ghardaïa)

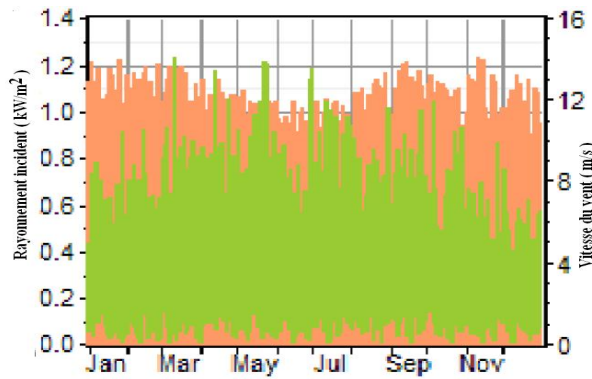


Figure 3.13: Données mensuelles – Radiation solaire et Vitesse de vent (Site Adrar)

Les distributions quotidiennes de l'irradiation solaire et la vitesse du vent (éolien) sont données mensuellement et cela pour les différents sites.

Un cas d'hiver et d'été sont des cas démontrés dans les figures 3.14, 3.15, et 3.16, respectivement. On constate que la puissance éolienne peut être générée en général, les jours nuageux.

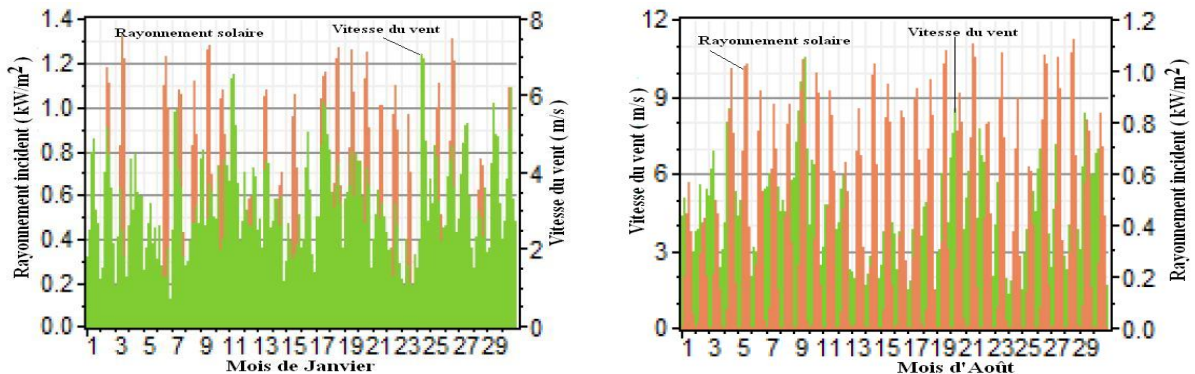


Figure 3.14: Données de radiation solaire et vitesse du vent à Ghardaïa

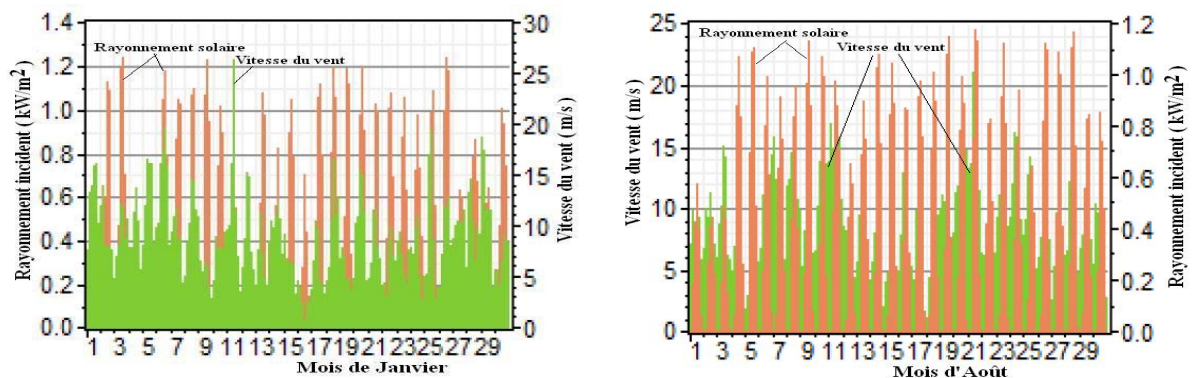


Figure 3.15: Données de radiation solaire et vitesse du vent à Adrar

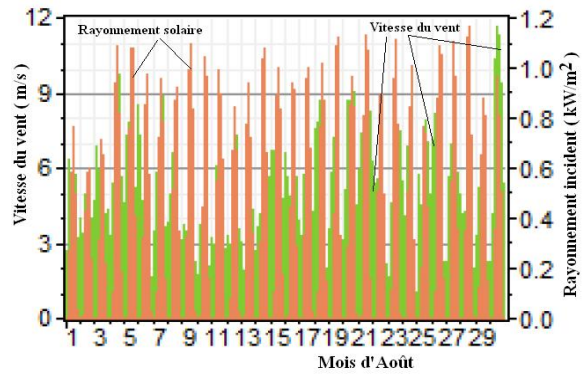
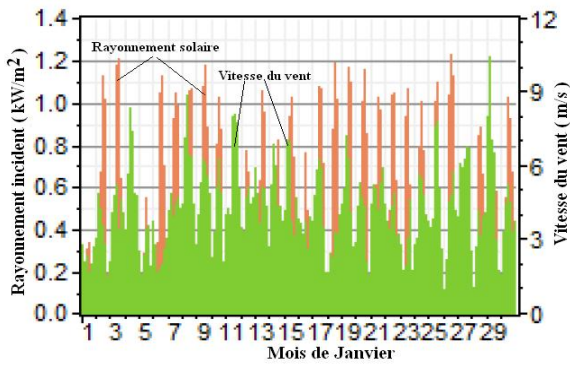


Figure 3.16: Données de radiation solaire et vitesse du vent à Tamanrasset

Enfin, une journée-type est choisie pour l'analyse de la répartition entre le rayonnement solaire et la vitesse du vent, comme le montre les figures 3.17, 3.18 et 3.19. La vitesse du vent se produit habituellement tôt le matin, elle diminue la fin de journée.

Le rayonnement solaire est le plus élevé vers midi, pour la journée.

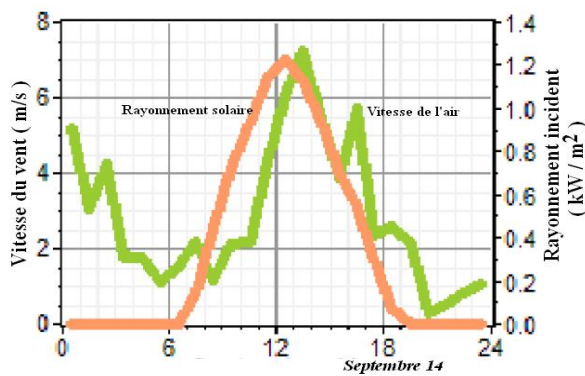


Figure 3.17: Rayonnement solaire et vitesse du vent, une journée typique, site Adrar

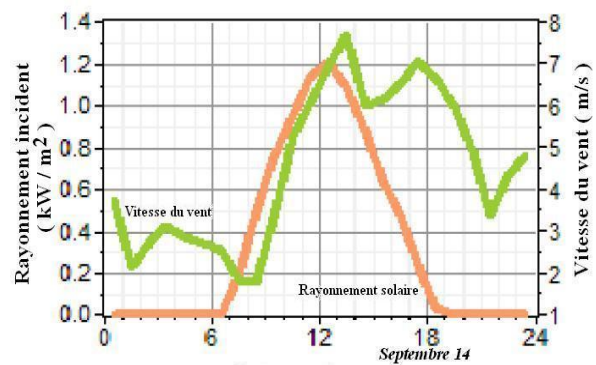


Figure 3.18: Rayonnement solaire et vitesse du vent, une journée typique, site Ghardaïa

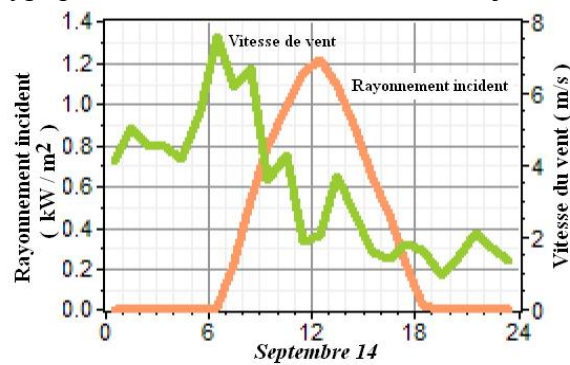


Figure 3.19: Rayonnement solaire et vitesse du vent, une journée typique, site Tamanrasset

Les applications hybrides solaire-éolien sont adaptées au site du Adrar et non pas à Ghardaïa, ni à Tamanrasset, et peuvent fournir un facteur d'une meilleure utilisation des ressources énergétiques renouvelables et peuvent offrir une alimentation fiable en électricité.

3.11 Profil de charge

La donnée initiale dans la mise en œuvre d'un système de production à source renouvelable d'énergie comme pour tout autre système énergétique est la demande, qui va être déterminée par rapport à la et/ou les charges à alimenter. Cette demande doit être estimée aussi précisément que possible tant d'un point de vue des puissances appelées que de sa répartition temporelle, même si son caractère souvent aléatoire rend cette tâche bien difficile.

L'éclairage et la production de froid représentent sans aucun doute les deux besoins essentiels d'une habitation. L'information et les loisirs sont de nos jours indissociables d'une vie en société. Même dans les régions les plus éloignées du globe, un poste de télévision (ou au moins une radio) fait souvent partie des appareils traditionnels d'une habitation. Le ventilateur, quant à lui, n'est sollicité que durant la période estivale (juin Août).

Le profil de charge est basé hypothétiquement sur une maison individuelle.

L'estimation de la consommation électrique d'une habitation pour chacun des trois sites est représentée dans les tableaux (3.3), (3.4) et (3.5).

Equipement par usage

Usage	Equipement	Puissance (W)	Nbre	Durée (h)	Consommation. (Wh/j)
Eclairage	Lampe Fluo-compacte 30 W	30	6	6	1080
Réfrigération	conservateur	77	1	24	1848
Electroménager	Lave-linge 25 l.	125	1	1	125
Electroménager	Ventilateur plafond (brasseur)	40	3	5	600
Audio-visuel	Chaîne stéréo +CD 2x50 W	50	1	0,5	50
Audio-visuel	Téléviseur C42cm	50	1	10	500
Pompage, traitement d'eau	Sur presseur 350 l/h Ballon 100 l.	75	1	0,5	37,5
Matériel bureau informatique	Ecran 13''	50	1	1	50

Tableau 3.3: Equipement par usage

Utilisation	Puissance (W)	Consommation (Wh/j)
Audio-visuel	100	550
Eclairage	180	1080
Electroménager	370	725
Réfrigération (+2°C)	77	1848

Tableau 3.4: Récapitulatif des besoins

Printemps (Wh/j)	
Eté (Wh/j)	4625
Automne (Wh/j)	3905
Hiver (Wh/j)	3544
Besoins moyens journalier en période d'utilisation (Wh/j)	3994

Tableau 3.5: Besoins mensuels

Sur les figures suivantes, nous présentons les diagrammes relatifs aux profils de charge journaliers en période (Jan-Mai) et (Sep-Déc.) et en période d'été (Juin-Août) pour une habitation et également pour l'ensemble du village pour chacun des trois sites considérés.

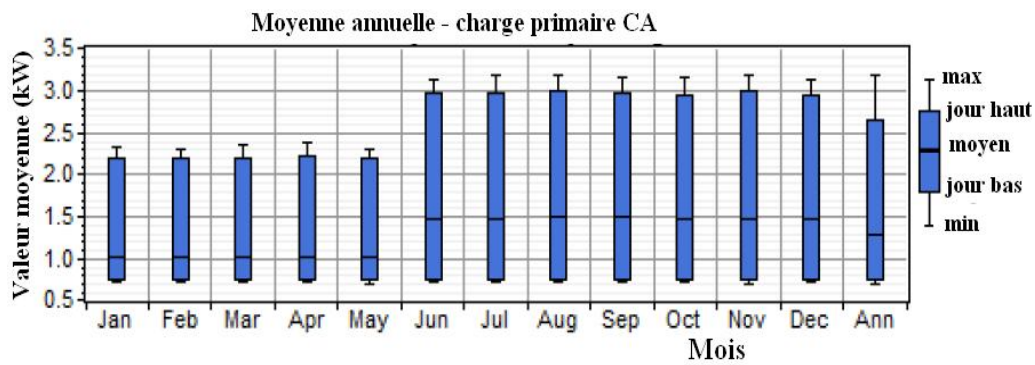
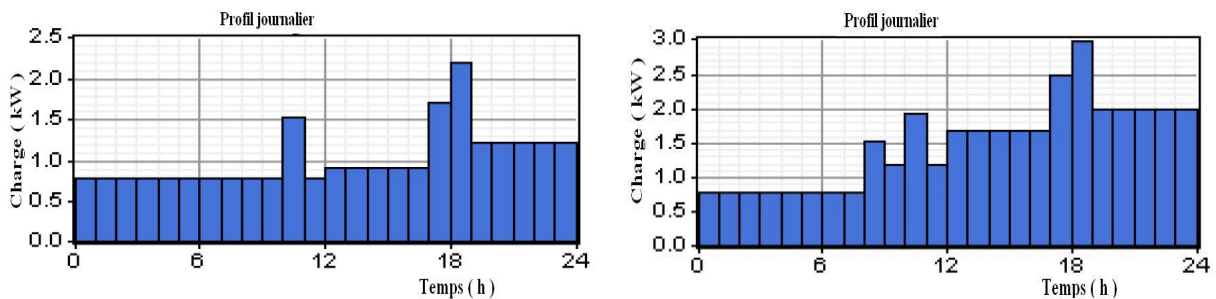


Figure 3.20: Profil de charge annuel d'une habitation période (janvier-mai) et (septembre-décembre)



a-période hivernale

b-période estivale

Figure 3.21: Profil de charge journalier d'une habitation (hiver)

3.12 Paramètres de simulation

Pour la simulation des différents systèmes, nous avons adopté des paramètres techniques et économiques communs pour les introduire dans le logiciel **Homer**. Il s'agit:

3.12.1 Paramètres techniques

a-Choix de l'onduleur

D'après les profils de consommation électrique de la charge pour chacun des sites, le système de conversion 'onduleur' DC/AC, devrait alors délivrer une puissance nominale d'au moins égale au pic de la puissance électrique de la charge. Mais par mesure de sécurité, on prendra environ 30 % de marge supplémentaire. Ainsi le choix s'est porté sur un convertisseur de puissance 4 kW et 90 % de rendement pour les trois sites.

b-Choix du régulateur

La puissance maximale que le convertisseur doit délivrer, est de 3,2 kW pour les trois sites d'implantation. Si on considère que le rendement du convertisseur est de 90 %, alors le choix serait un régulateur de puissance nominale de 4,46 kW (pour les sites de Ghardaïa, Adrar et Tamanrasset). La tension nominale du régulateur est conditionnée donc par la tension de service du convertisseur et surtout par la tension de la batterie. Afin de minimiser le courant de consommation et réduire la capacité de la batterie, nous avons choisi une tension nominale de 48 V.

c-Choix de la batterie

La batterie est dimensionnée en fonction de la charge et le nombre de jours d'autonomie. Le nombre de jours d'autonomie a été estimé à 2 jours pour l'ensemble des sites. Si on faisait le choix d'une batterie avec une profondeur de décharge de 70 % et avec une tension de 48 V, alors la capacité de stockage serait évaluée à 2000 Ah pour les dits sites.

d-Choix du champ photovoltaïque et de l'aérogénérateur

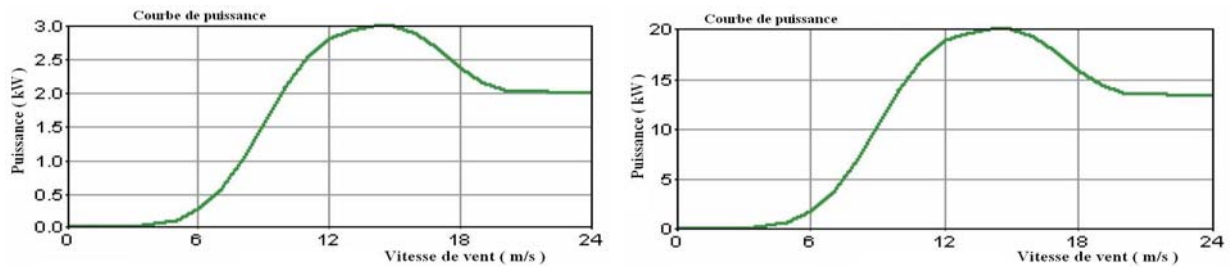
Homer est un modèle de simulation horaire. Il utilise ces entrées pour déterminer les dimensions optimales de chaque type de système. Ce programme effectue toutes les combinaisons entre les composants du système, qui sont capables de satisfaire la demande. Les solutions faisables sont classées selon le coût et sur la durée de vie du système.

Pour les systèmes photovoltaïques, **Homer** utilise l'équation (3.1) pour calculer l'énergie produite par le champ photovoltaïque.

$$E_p = d \times P_{ch} \times G_{in} \quad (3.1)$$

Où d est le facteur (derating factor), pris égal à 80 %; P_{ch} est la puissance totale du champ Photovoltaïque et G_{in} est le rayonnement solaire global sur un plan incliné.

Pour les systèmes éoliens, notre choix a porté sur deux types d'aérogénérateurs (Generic 20 kW) et (Generic 3 kW) dont les courbes de puissance sont illustrées dans la figure 3.22.



a- Generic 3 kW

b- Generic 20 kW

Figure 3.22: Courbes de puissance pour les aérogénérateurs choisis

Pour le calcul de la puissance débitée par chacun des aérogénérateurs, **Homer** utilise :

- Les moyennes mensuelles de la vitesse du vent;
- Les valeurs du facteur de forme k , du modèle de Weibull. Mais pour des raisons de manque de ces valeurs, nous avons utilisé le modèle de Rayleigh ($k=2$) pour chacun des sites;
- Le facteur d'auto corrélation est aussi une mesure du caractère aléatoire du vent. Des valeurs élevées de ce facteur indiquent que la vitesse du vent à un moment quelconque, tend à dépendre fortement de la vitesse du vent au moment précédent. Tandis que des valeurs faibles indiquent que la vitesse du vent tend à fluctuer dans un sens aléatoire d'une heure à une autre.
- Ce paramètre est affecté par la topographie du lieu considéré. Ce facteur tend à être plus faible (0,7-0,8) pour les endroits dont la topographie est complexe et il est plus élevé (0,9-0,97) dans les endroits dont la topographie est plus uniforme. Dans notre application, nous avons supposé un facteur d'auto corrélation de 0,85 pour chacun des trois sites.
- Le motif de la force est une mesure de la vitesse du vent, qui peut être fortement liée au temps dans la journée. Dans plusieurs localités, par exemple, l'après-midi tend à être plus venté que la matinée. Des valeurs plus élevées indiquent qu'il y a une dépendance relativement forte du temps dans la journée. Par contre, des valeurs faibles indiquent que la vitesse du vent n'est pas forcément liée au temps dans la journée. Une valeur de 0,25 est supposée pour les trois sites.

3.12.2 Paramètres économiques

Elles concernent les données financières et les coûts des équipements. Le générateur photovoltaïque est disponible à un coût équivalent à 455 000 DA/kWc. Sa durée de vie est estimée à 25 ans.

Le coût de l'onduleur est équivalent à 105 000 DA/kW et sa durée de vie est de 10 ans.

Quant aux batteries, leur prix est équivalent à 21 000 DA/kWh et elle devrait avoir une durée de vie de 8 ans.

Le groupe Diesel électrogène coûte environ 35 000 DA/kW et a besoin d'être remplacé tous les 4 ans.

Le prix du carburant est considéré égal à 14 DA/litre, les trois sites avec une consommation spécifique de 0,55 l/kWh. Le générateur éolien (3 kW) coûte environ 560 000 DA et celui de (20 kW) coûte environ 3 290 000 DA. Leur durée de vie est de 15 ans.

En Algérie, le taux d'inflation est d'environ 3 %. On peut prendre comme valeur du taux d'actualisation, le taux de la plupart de prêts commerciaux 10 %. Les hypothèses de coûts sur lesquelles nous avons basé nos calculs, sont représentés sur le tableau 3.6.

Composants	PV	Batterie	Générateur diesel	Onduleur	Aéro générateur 3kW	Aéro générateur 20kW
Coût d'investissement	455 000 DA/kWc	21 000 DA/kW	35 000 DA/kW	105 000 DA/kW	560 000 DA	3 290 000 DA
Durée de vie	25 ans	8 ans	4 ans	10 ans	15 ans	15 ans
Coût d'opération et maintenance	0	0	23.1 DA/h	17 DA/an	100	100
Coût de remplacement	420 DA/Wc	21 000 DA	35 000 DA/kW	105 000 DA/kW	490 000 DA	3 220 000 DA

Tableau 3.6: Coûts sur les composants des systèmes et des équipements

3.13 Conclusion

Ce chapitre a principalement présenté les différentes configurations de systèmes hybrides (PV, éolien, Diesel), le dimensionnement et la simulation de chacun de ces systèmes, et l'étude technique et économique des différents systèmes étudiés. Cette étude fait suite à la discussion des résultats obtenus par le logiciel **Homer**.

Chapitre 4

Résultats de simulation obtenus et discussions

4.1 Introduction

L'objet de ce chapitre consiste à la présentation des résultats de simulation obtenus dans le cadre du traitement du logiciel **Homer**.

Le logiciel **Homer** a été utilisé pour déterminer les caractéristiques de chaque composant du système hybride. En entrée dans le programme, des grandeurs et des données ont été proposées, à savoir:

- ✓ Données horaires de la charge à alimenter au cours de l'année
- ✓ Moyennes mensuelles des radiations solaires sur divers plans, des vitesses du vent
- ✓ Caractéristiques des sites d'implantation
- ✓ Informations sur les divers composants sur des structures des systèmes hybrides modélisés et proposés (modules, champ PV, aérogénérateur, onduleurs, éléments de batteries, groupe électrogènes,)
- ✓ Divers coûts de composants des systèmes.

Ensuite après le traitement des données, le logiciel **Homer** donne les résultats sous la forme de courbes, d'histogrammes,... sur les diverses architectures des systèmes utilisant les énergies renouvelables, hybrides pour l'alimentation électrique des habitations d'un village situé en milieu saharien et en milieu semi aride (Adrar, Ghardaïa, Tamanrasset).

4.2 Système photovoltaïque seul

Les rayonnements solaires mensuels sur plan horizontal et sur plan incliné sont représentés sur les figures 4.1 à 4.9, pour chacun des trois sites, Adrar, Ghardaïa et Tamanrasset.

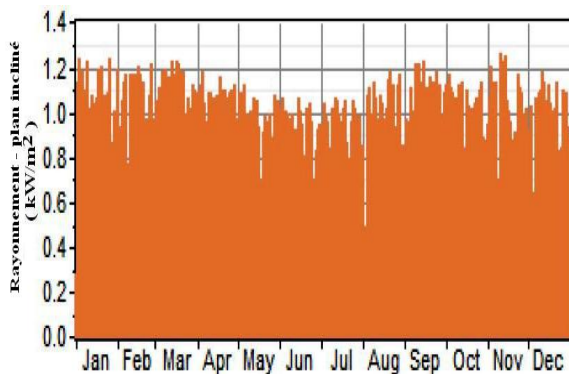


Figure 4.1: Rayonnement - plan incliné
Adrar

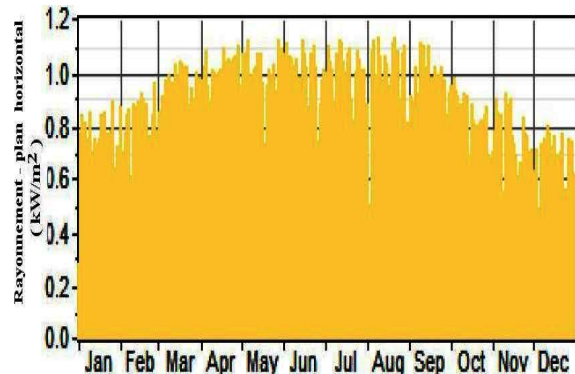


Figure 4.2: Rayonnement - plan horizontal
Adrar

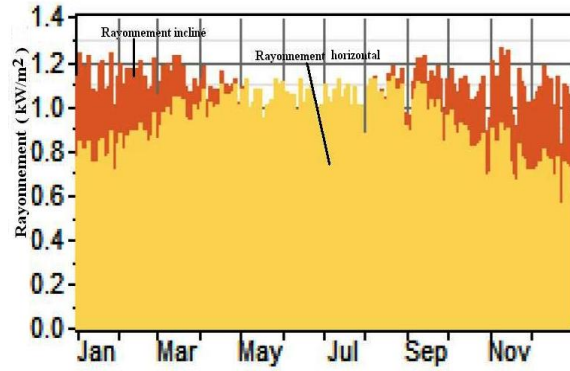


Figure 4.2: Rayonnement - plan horizontal et – plan incliné – Adrar

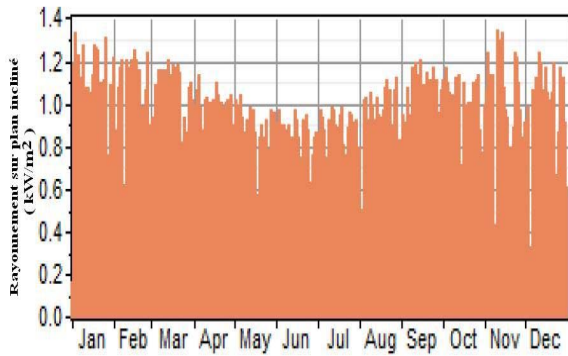


Figure 4.4: Rayonnement - plan incliné Ghardaïa

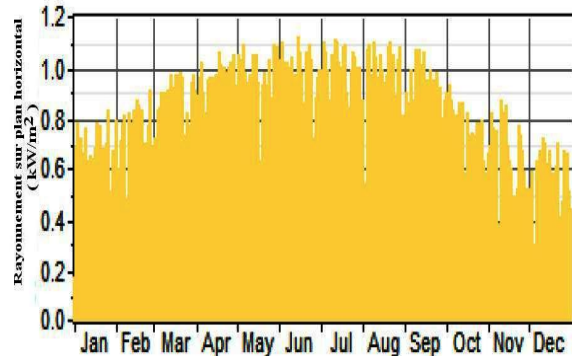


Figure 4.5: Rayonnement - plan horizontal Ghardaïa

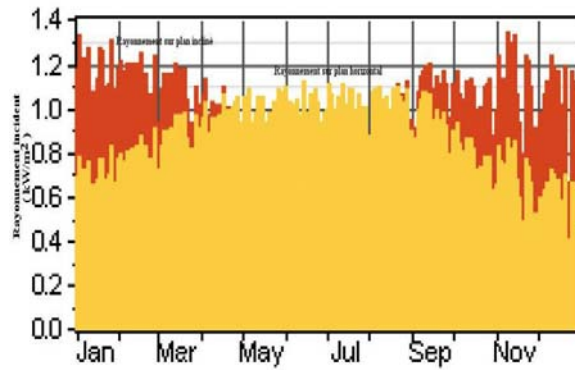


Figure 4.6: Rayonnement - plan horizontal et – plan incliné - Ghardaïa

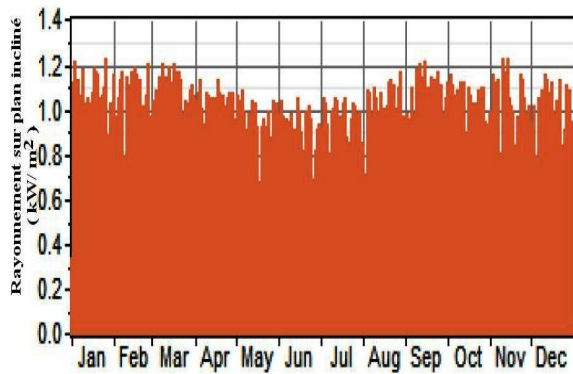


Figure 4.7: Rayonnement - plan incliné Tamanrasset

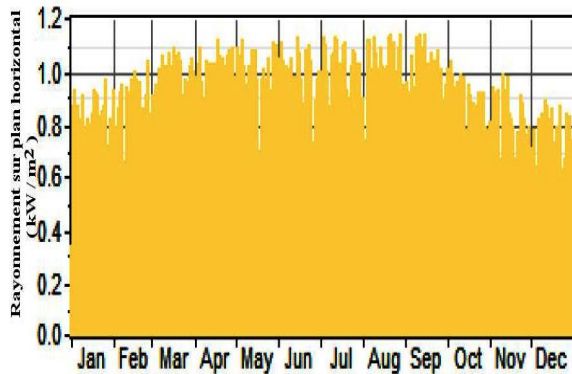


Figure 4.8: Rayonnement - plan horizontal Tamanrasset

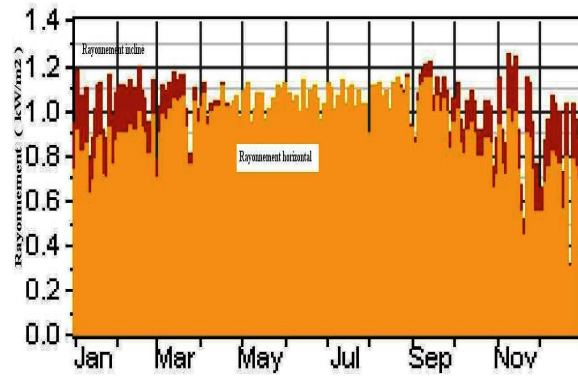


Figure 4.9: Rayonnement - plan horizontal et – plan incliné – Tamanrasset

On remarque d’après ces figures, qu’il y a une parfaite corrélation entre l’irradiation solaire incidente sur le plan du champ photovoltaïque et la puissance photovoltaïque produite.

Site Adrar



Figure 4.10: Profil de charge – Adrar

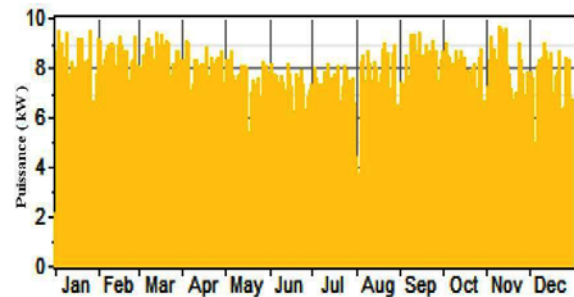


Figure 4.11: Energie produite par PV - Adrar

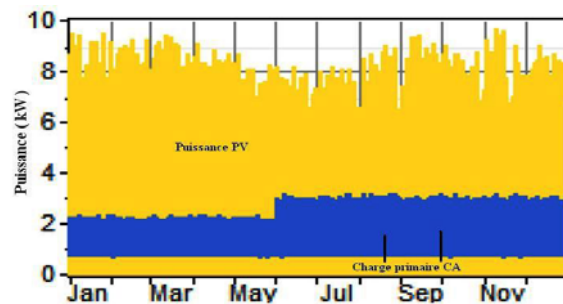


Figure 4.12: Profil de charge et énergie produite par PV – Adrar

Site Ghardaïa



Figure 4.13: Profil de charge - Ghardaïa

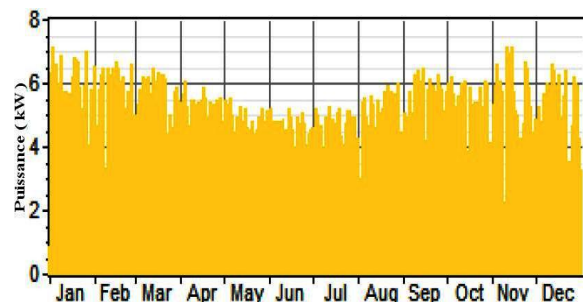


Figure 4.14: Energie produite par PV - Ghardaïa

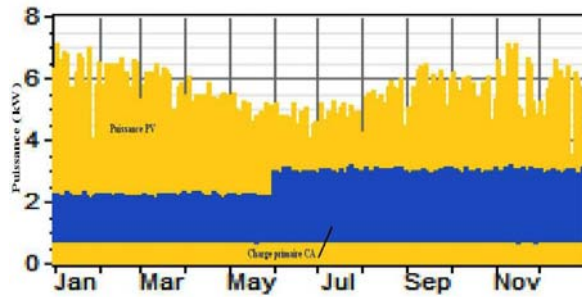


Figure 4.15: Profil de charge et énergie produite par PV – Ghardaïa

Site Tamanrasset

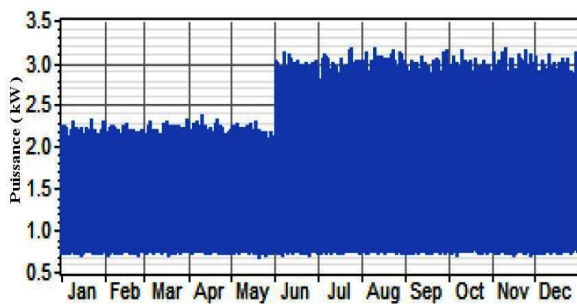


Figure 4.16: Profil de charge – Tamanrasset.

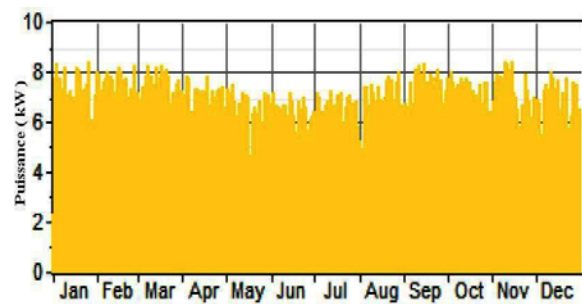


Figure 4.17: Énergie produite par PV – Tamanrasset.

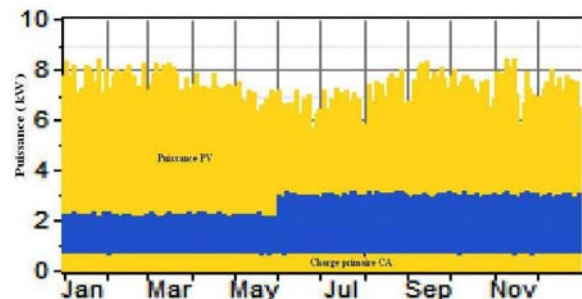


Figure 4.18: Profil de charge et énergie produite par PV – Tamanrasset.

Les trois groupes de figures, relatifs aux sites choisis, représentent l'évolution mensuelle de la puissance électrique produite par le champ. Le champ photovoltaïque est capable de satisfaire les charges primaires en courant alternatif, pendant l'ensemble des mois de l'année.

Par ailleurs, le logiciel **Homer** nous a fourni des courbes représentant l'évolution de la charge primaire, la production d'énergie électrique par le champ photovoltaïque, l'état de charge du parc de batteries, pour le trois sites (période hivernale et en période estivale).

Site Adrar

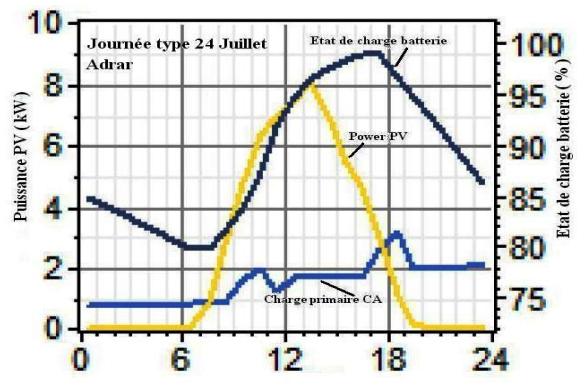
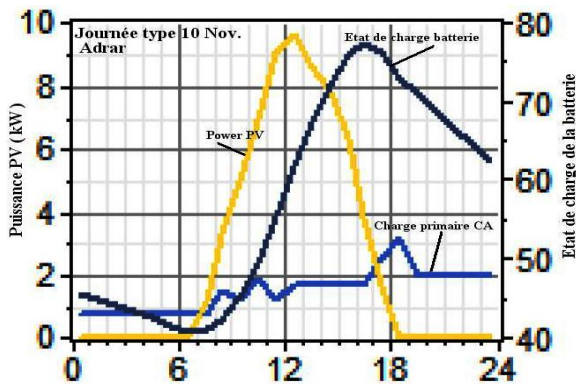


Figure 4.19: Evolution de la charge, puissance photovoltaïque et état de charge de la batterie pour deux journées type (10 novembre et 24 juillet) - Adrar

Site Ghardaïa

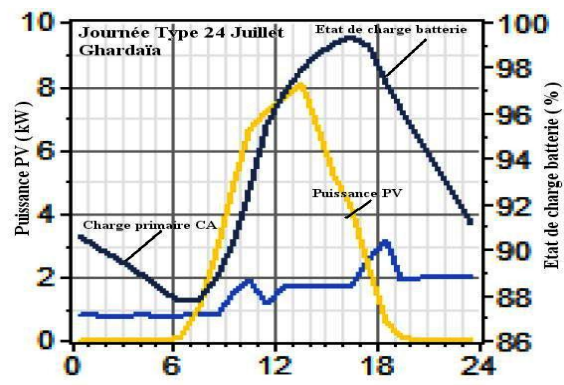
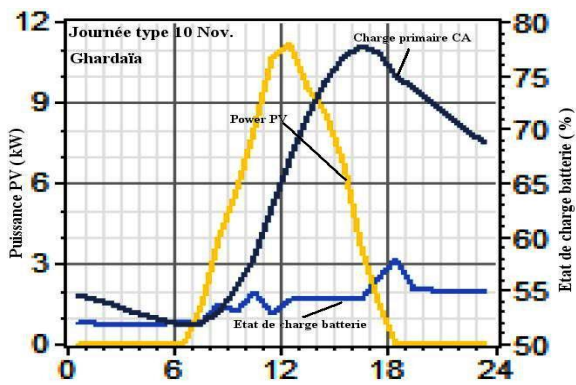


Figure 4.20: Evolution de la charge, puissance photovoltaïque et état de charge de la batterie pour deux journées type (10 novembre et 24 juillet) - Ghardaïa

Site Tamanrasset

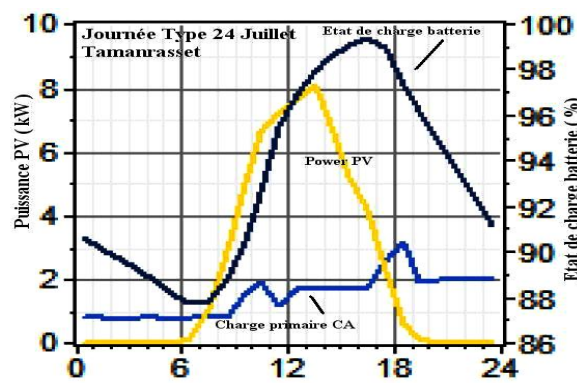
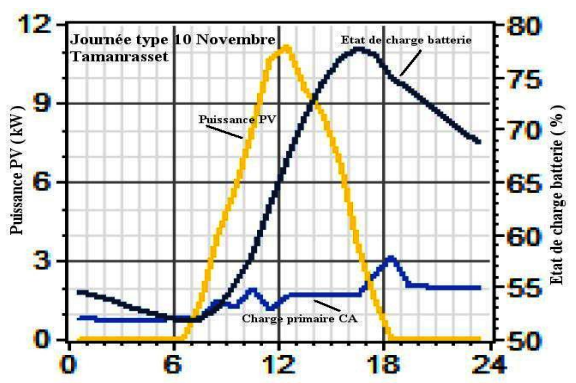


Figure 4.21: Evolution de la charge, puissance photovoltaïque et état de charge de la batterie pour deux journées type (10 novembre et 24 juillet) - Tamanrasset

Les figures précédentes représentent l'évolution journalière de la puissance électrique photovoltaïque, l'état de charge du parc de batterie, ainsi que le profil de la charge primaire, pour deux journées type (10 Novembre et 24 Juillet). Le champ photovoltaïque produit de l'énergie électrique entre 7h30mn et 18h pour la journée du 10 novembre et entre 6h et 20h pour la journée du juillet. Ces horaires correspondent aux heures du lever et de coucher du soleil des sites considérés. Le champ photovoltaïque est capable de satisfaire la charge pendant ces heures et de charger le parc de batterie qui prend le relais pendant la nuit.

Les trois figures suivantes représentent la production moyenne mensuelle électrique par le champ de modules photovoltaïques, pour les trois sites choisis, 'Adrar, Ghardaïa et Tamanrasset'.

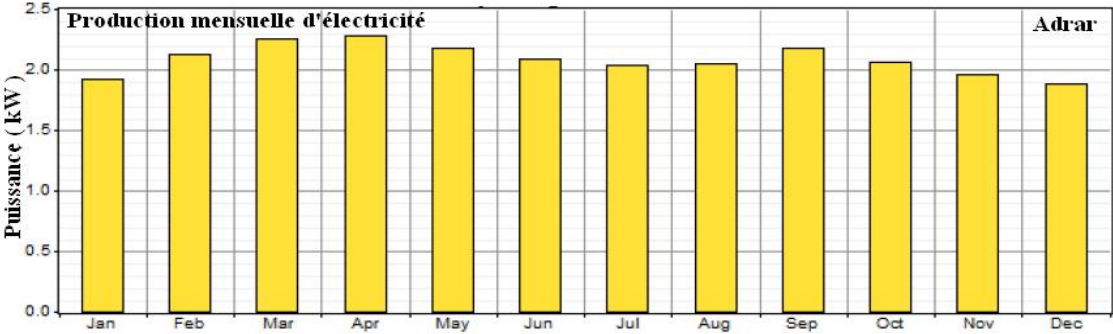


Figure 4.22: Production mensuelle d'électricité par le PV (Adrar)

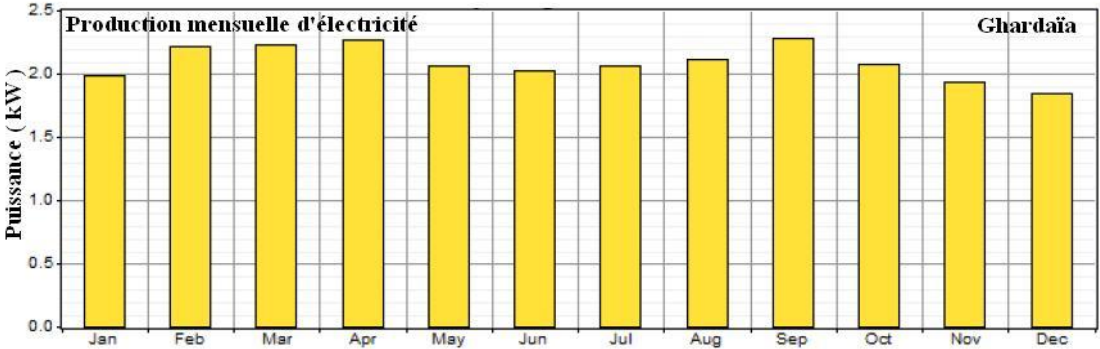


Figure 4.23: Production mensuelle d'électricité par le PV (Ghardaïa)

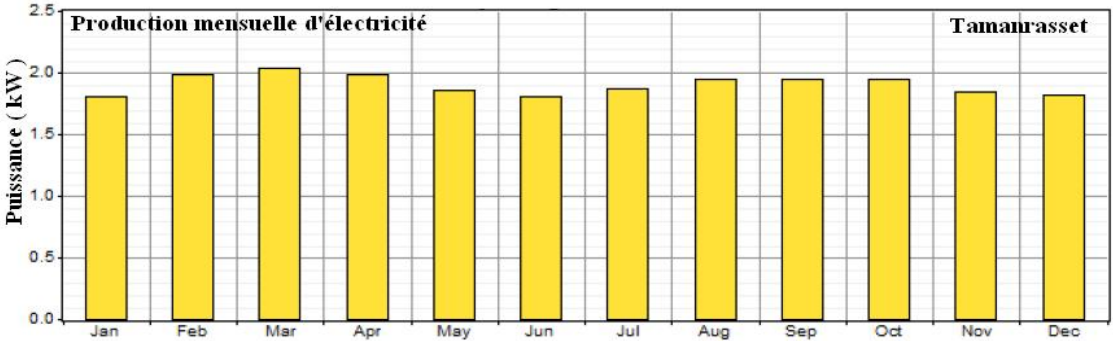


Figure 4.24: Production mensuelle d'électricité par le PV (Tamanrasset)

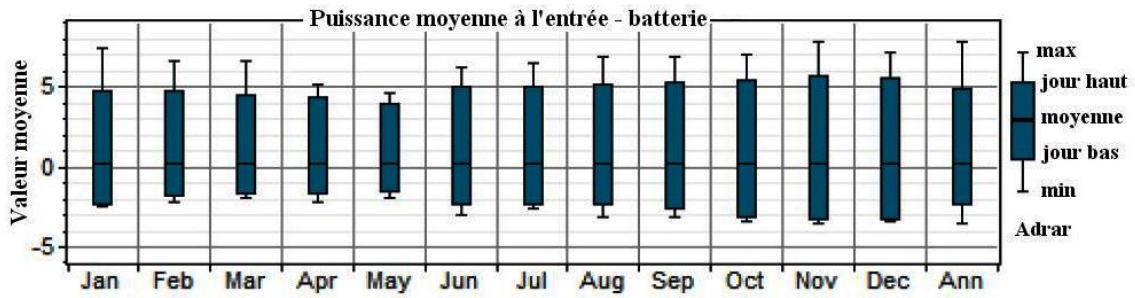


Figure 4.25: Puissance moyenne à l'entrée – batterie – Adrar

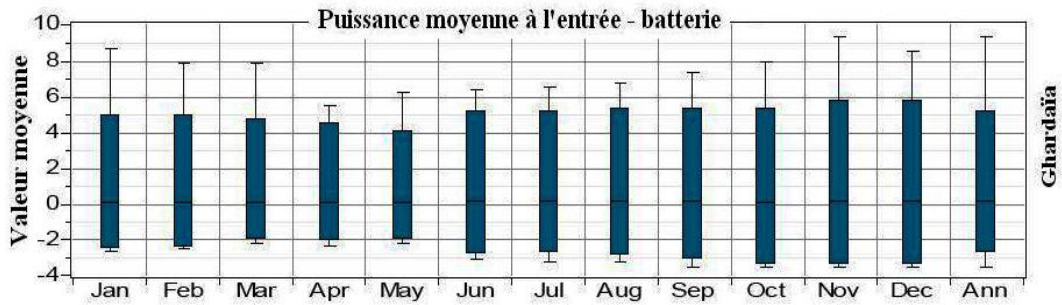


Figure 4.26: Puissance moyenne à l'entrée – batterie – Ghardaïa

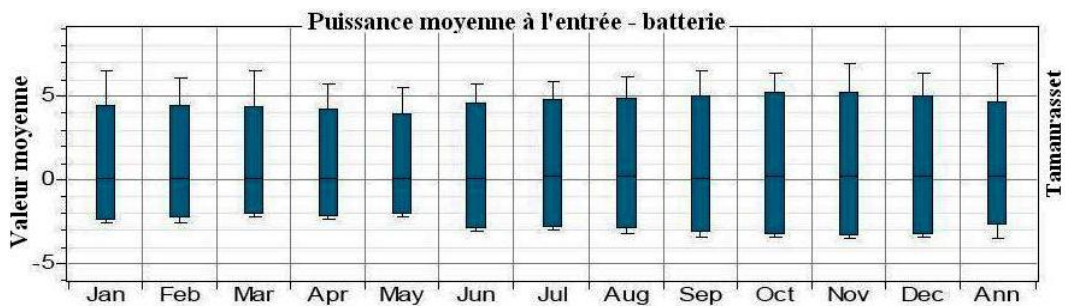


Figure 4.27: Puissance moyenne à l'entrée – batterie – Tamanrasset

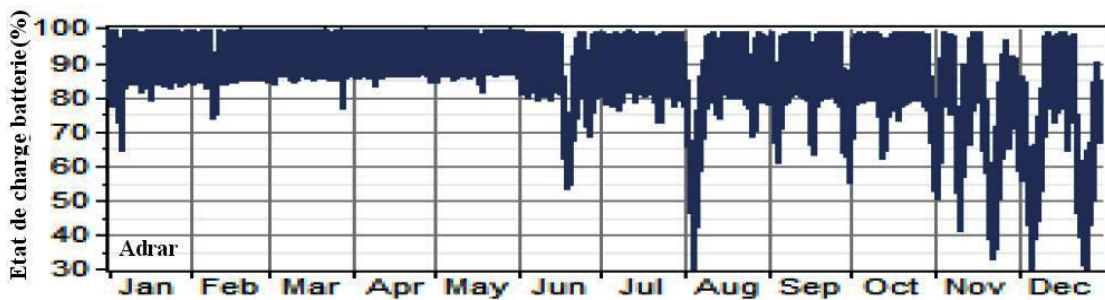


Figure 4.28: Evolution de l'état de charge de la batterie en fonction des mois - Adrar

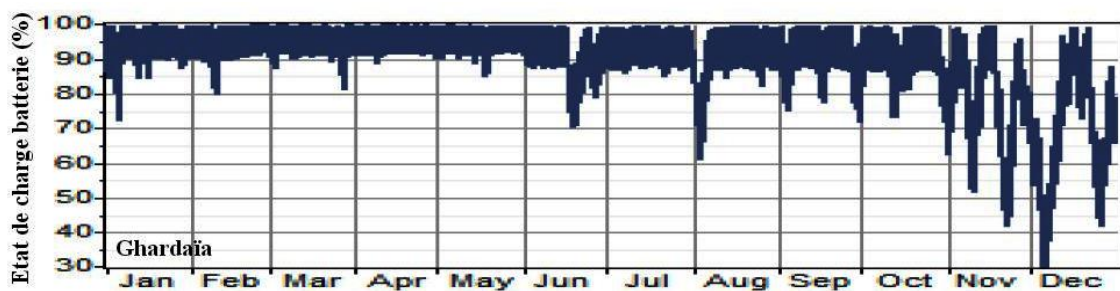


Figure 4.29: Evolution de l'état de charge de la batterie en fonction des mois – Ghardaïa

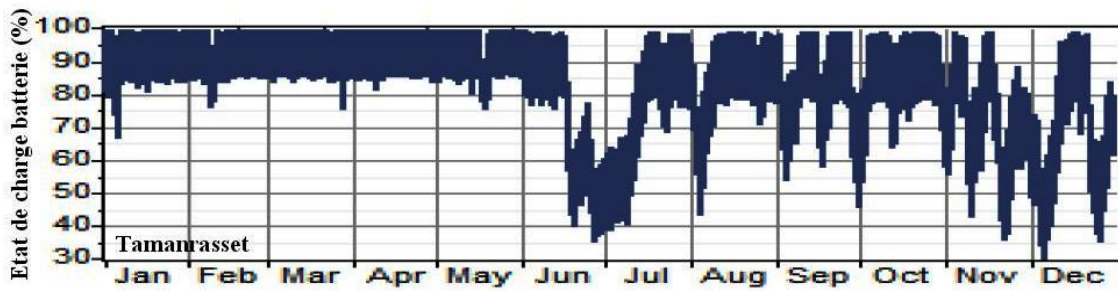


Figure 4.30: Evolution de l'état de charge de la batterie en fonction des mois – Tamanrasset

On constate, d'après ces figures, que les batteries subissent des fortes décharges pendant la période hivernale, atteignant jusqu'à 70 %, et modérées pendant le reste de l'année, sauf pour le cas du site de Ghardaïa. Par contre, pour Tamanrasset, la batterie subit également des fortes décharges en période estivale.

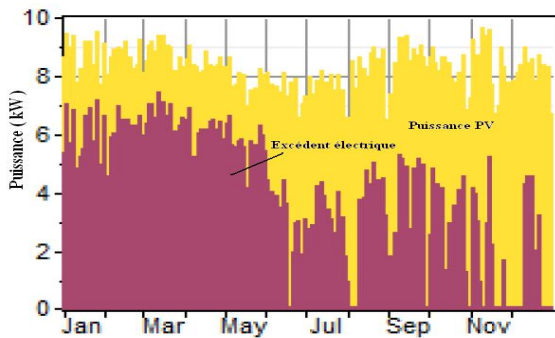


Figure 4.31: Production PV et excédent d'électricité – Adrar

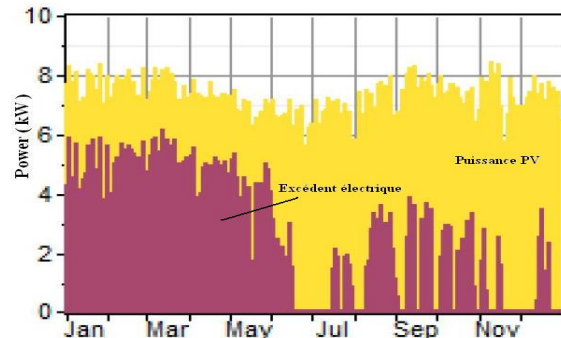


Figure 4.32: Production PV et excédent d'électricité - Ghardaïa

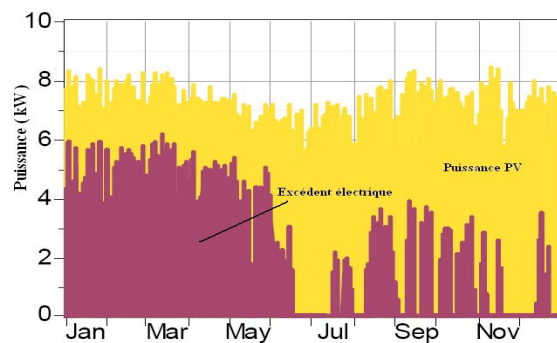


Figure 4.33: Production PV et excédent d'électricité - Tamanrasset

Les trois figures précédentes représentent la puissance électrique photovoltaïque et l'excédent d'électricité. On remarque que l'excédent d'électricité pour Adrar est d'environ 25.8 %, pour Ghardaïa de 26.1 % et pour Tamanrasset de 18.7 %.

Par ailleurs, il faudrait tenir compte des coûts financiers relatifs aux divers composants du système.

Partie financière

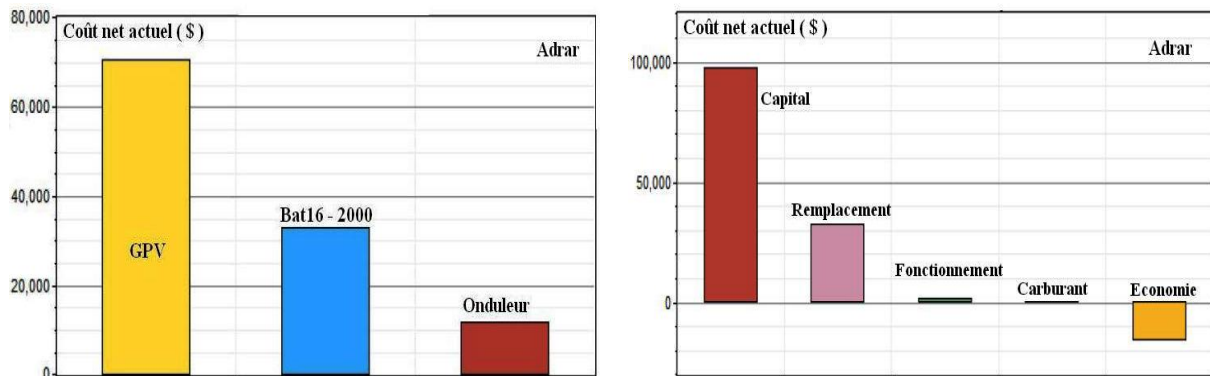


Figure 4.34: Coût actuel net par équipement et par structure d'opération - Adrar

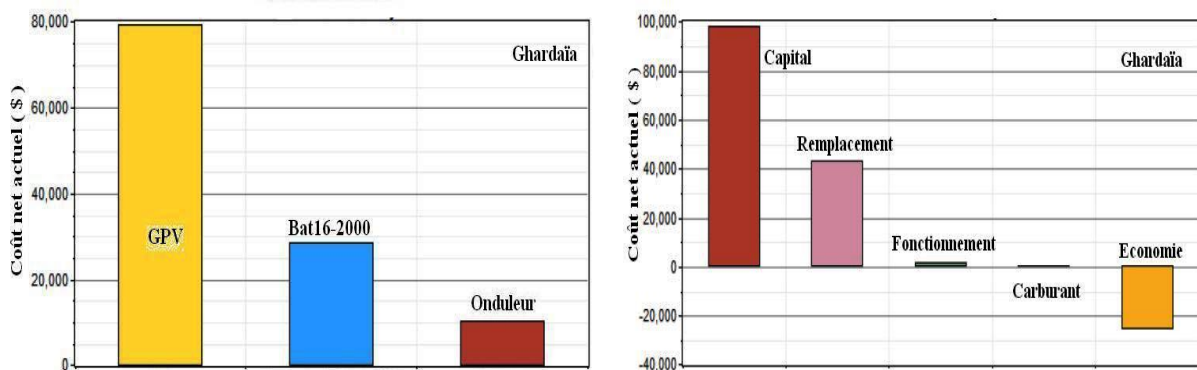


Figure 4.35: Coût actuel net par équipement et par structure d'opération – Ghardaïa

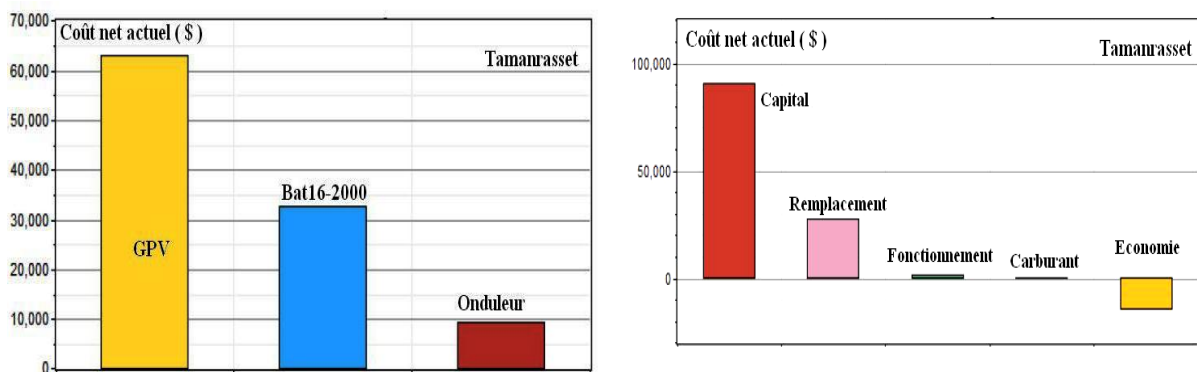


Figure 4.36: Coût actuel net par équipement et par structure d'opération – Tamanrasset

Les figures représentent les coûts nets actuels par structure d'opération (capital investi, remplacement de composant, fonctionnement du système,...) et par composant des systèmes pour chaque site. On remarque que le coût du champ PV est le plus élevé par rapport aux autres composants et que le coût net actuel par type est toujours le plus élevé.

Tableau 4.1: Caractéristiques techniques et économiques du système PV seul (Adrar)

Photovoltaïque seul	
Configuration du système	
Champ	9.6 kWc
Batterie	24 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Energie de sortie	
Champ PV	18 253 kWh/année
Excès d'énergie	4 707 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelable	100 %
Utilisation de carburant	0 litre/année
Economie en carburant	0 litre/année
Coût	
Investissement	7 004.30 DA
Remplacement et entretien	99 508.62 DA/ année
CAN total	8 230 221.91 DA
Coût d'énergie	57.271 DA/kWh

Tableau 4.2: Caractéristiques techniques et économiques du système PV seul (**Ghardaïa**)

Photovoltaïque seul	
Configuration du système	
Champ	10.5 kWc
Batterie	40 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Energie de sortie	
Champ PV	18 317 kWh/année
Excès d'énergie	4 773 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelables	100 %
Utilisation de carburant	0 litre/année
Economie en carburant	0 litre/année
Coût	
Investissement	7 087.323 DA
Remplacement et entretien	88 841.868 DA/ année
CAN total	8 429 095.964 DA
Coût d'énergie	48.036 DA/kWh

Tableau 4.3: Caractéristiques techniques et économiques du système PV seul (**Tamanrasset**)

Photovoltaïque seul	
Configuration du système	
Champ	8.6 kWc
Batterie	24 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Energie de sortie	
Champ PV	16 694 kWh/année
Excès d'énergie	3 127 kWh/année
Fraction d'ER	100 %
Utilisation de carburant	0 l/année
Economie du carburant	0 l/année

Coût

Investissement	6 535.914 DA
Remplacement et entretien	80 251.196 DA/ année
CAN total	7 519 343.779 DA
Coût d'énergie	52.332 DA/kWh

4.3 Système photovoltaïque / diesel

Toujours dans la même idée, on a mis en place un système hybride composé d'un générateur photovoltaïque et d'un groupe électrogène (Gén. Diesel), qui fait les mêmes fonctions, la production d'énergie électrique. Pour ce travail, le logiciel **Homer**, ayant traité les données précédentes, a fait des simulations et a présenté des résultats sous la forme de courbes, d'histogrammes,... sur cette architecture de système hybride.

Site Adrar

Les figures 4.37 et 4.38 présentent respectivement la distribution de l'électricité produite par l'énergie photovoltaïque et par le groupe électrogène, et également la production électrique par les deux systèmes et l'état de charge du parc batterie, pour le site d'Adrar.

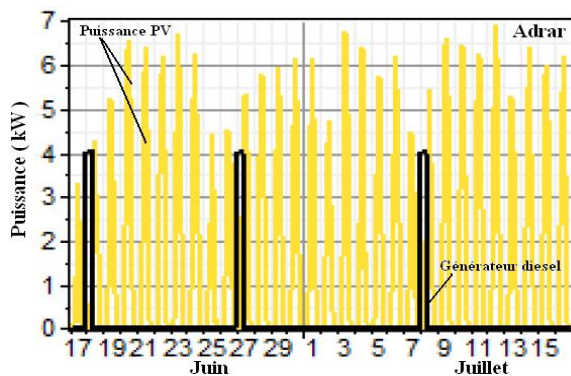


Figure 4.37: Production électrique par le champ PV et le générateur diesel

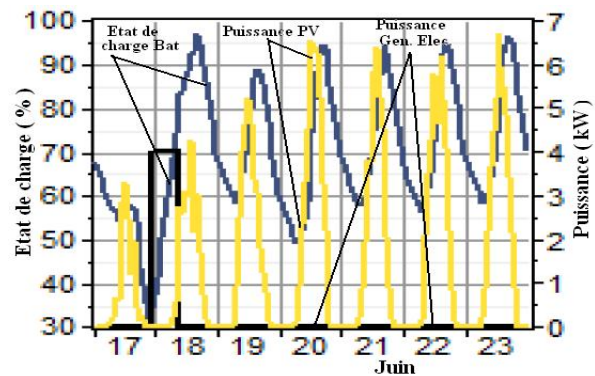


Figure 4.38: Production électrique par le PV et le diesel - Etat de charge du parc

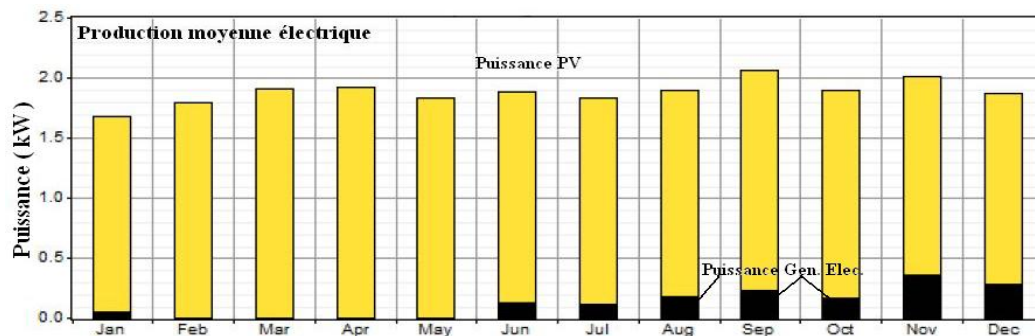


Figure 4.39: Production électrique issue du photovoltaïque et du diesel

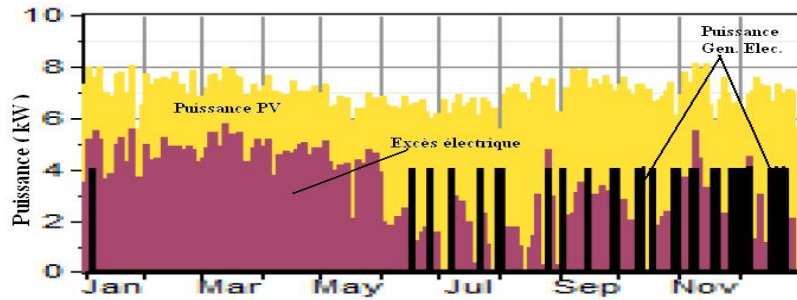


Figure 4.40: Production électrique par les deux systèmes et l'excédent électrique apporté
 On constate que la production électrique par le système PV est d'environ 93 % et celle produite par le diesel n'est que de 7 %. On note que l'excédent électrique est de l'ordre de 17.4 %.

Par ailleurs les histogrammes suivants présentent les divers coûts nets actuels, pour Adrar.

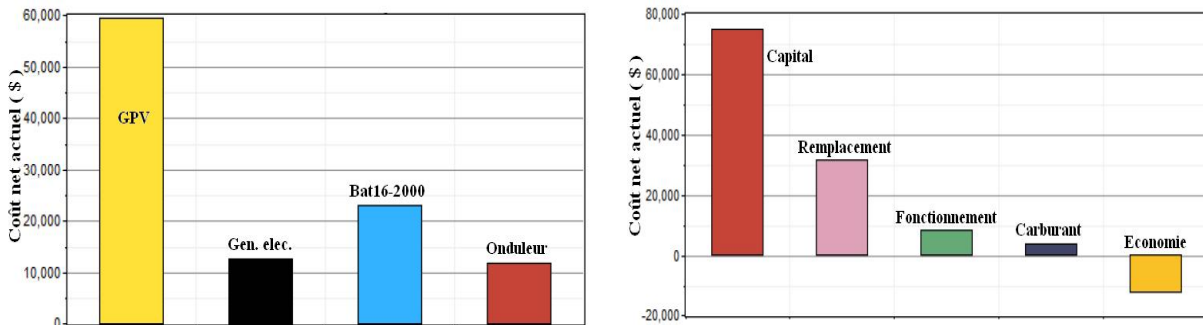


Figure 4.41: Coût net actuel par composant et par structure d'opération – Adrar

Tableau 4.4: Caractéristiques techniques et économiques du système PV/Diesel - Adrar

Photovoltaïque / Diesel	
Configuration du système	
Champ de modules photovoltaïques	8.1 kWc
Batterie de stockage	12 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Génératrice Diesel	4 kW
Energie de sortie	
Champ photovoltaïque	1540 kWh/année
Excès d'énergie	2 868 kWh/année
Génératrice diesel	1 088 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelable	93.4 %
Utilisation de carburant	0 litre/année
Economie en carburant	0 litre/année
Coût	
Investissement	5 408.163 DA
Remplacement et entretien	2 868.62 DA/ année
CAN total	106 743.00 DA
Coût d'énergie	0.743 DA/kWh

Site Ghardaïa

Les deux figures suivantes représentent respectivement la distribution de l'électricité produite par l'énergie photovoltaïque et par le groupe électrogène, et également la production électrique par les deux systèmes et l'état de charge du parc batterie, pour le site de Ghardaïa. 'Figures 4.42 et 4.43'.

L'histogramme suivant donne la production électrique par le générateur photovoltaïque, qui est d'environ 86 % et la production par le générateur électrogène 14 %.

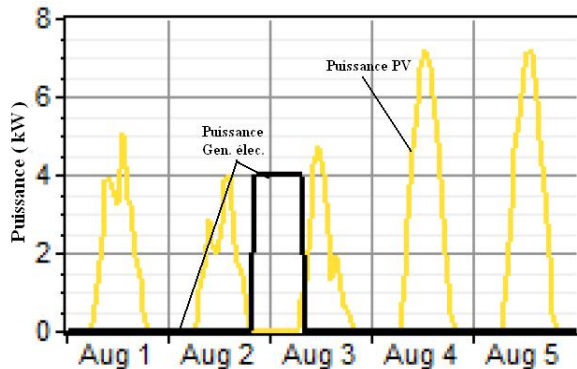


Figure 4.42: Production électrique par le champ PV et le générateur diesel

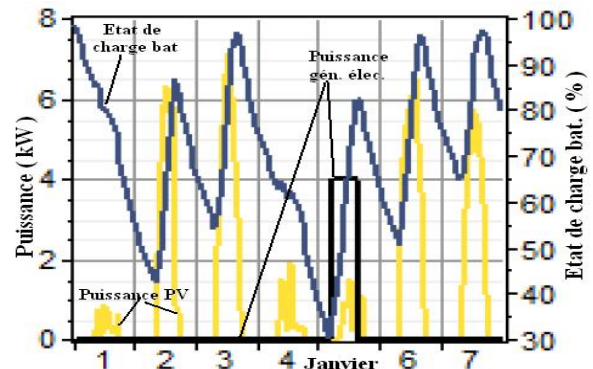


Figure 4.43: Production électrique par le PV et le diesel - Etat de charge du parc

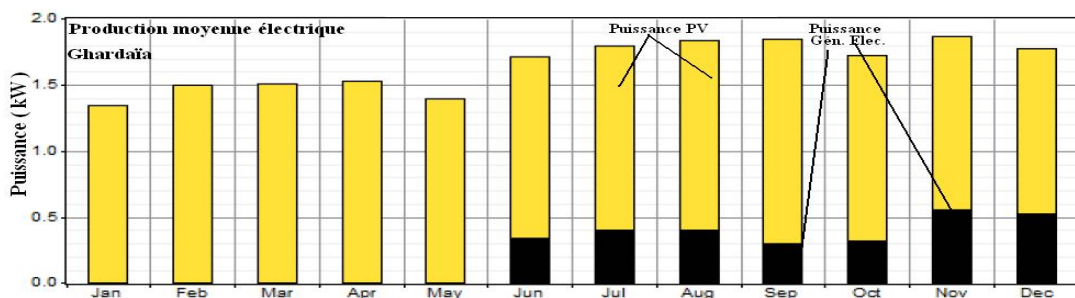


Figure 4.44: Production électrique issue du photovoltaïque et du diesel

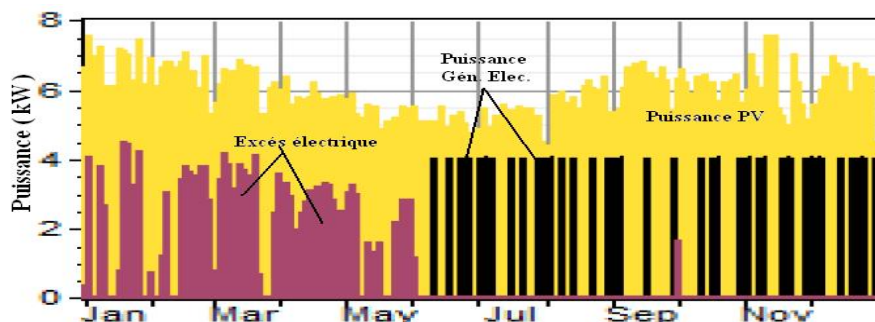


Figure 4.45: Production électrique par les deux systèmes et l'excédent électrique apporté

La figure précédente représente la production électrique réalisée par les systèmes (PV et Diesel) et le pourcentage de l'excédent d'électricité 5.64 %. Par ailleurs, les histogrammes suivants présentent les divers coûts nets actuels, pour Ghardaïa.

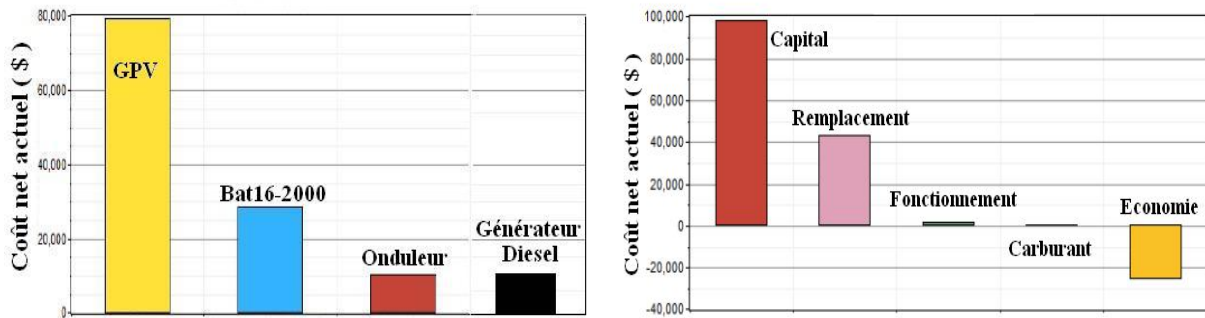


Figure 4.46: Coût net actuel par composant et par structure d'opération – Ghardaïa

Tableau 4.5: Caractéristiques techniques et économiques du système PV/Diesel - Ghardaïa

Photovoltaïque / Diesel	
Configuration du système	
Champ de modules photovoltaïques	7.1 kWc
Batterie de stockage	24 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Génératrice Diesel	4 kW
Energie de sortie	
Champ Photovoltaïque	12386 kWh/année
Excès d'énergie	816 kWh/année
Génératrice diesel	2 087 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelable	85.6 %
Utilisation de carburant	691 litre/année
Economie en carburant	0 litre/année
Coût	
Investissement	4 266 720 DA
Remplacement et entretien	132 081.585 DA/ année
CAN total	6 993 165.108 DA
Coût d'énergie	39.803 DA/kWh

Site Tamanrasset

Les figures 4.47 et 4.48 présentent respectivement la distribution de l'électricité produite par l'énergie photovoltaïque et par le groupe électrogène, et également la production électrique par les deux systèmes et l'état de charge du parc batterie, pour le site de Tamanrasset.

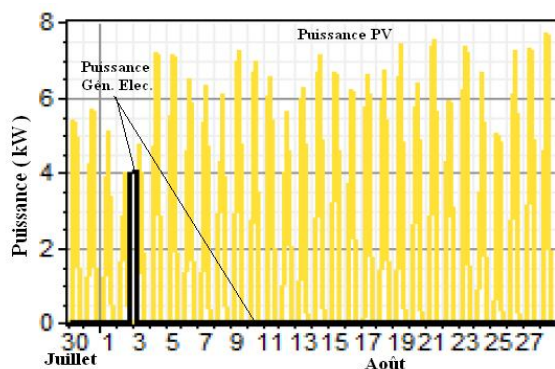


Figure 4.47: Production électrique par le

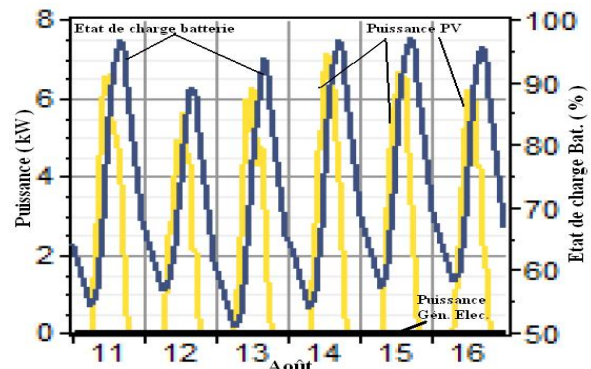


Figure 4.48: Production électrique par le PV

champ PV et le générateur diesel

et le diesel - Etat de charge du parc

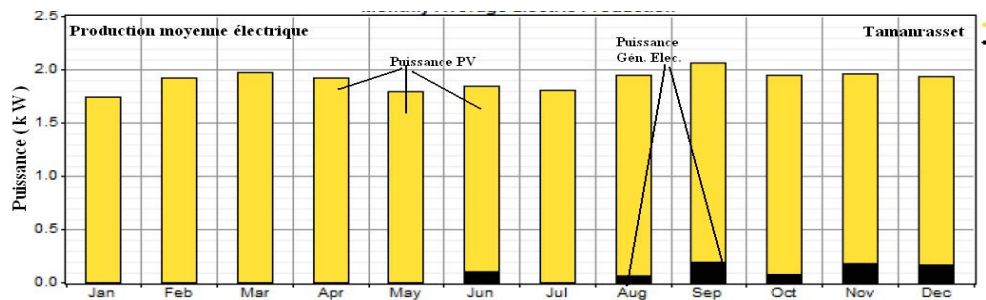


Figure 4.49: Production électrique issue du photovoltaïque et du diesel

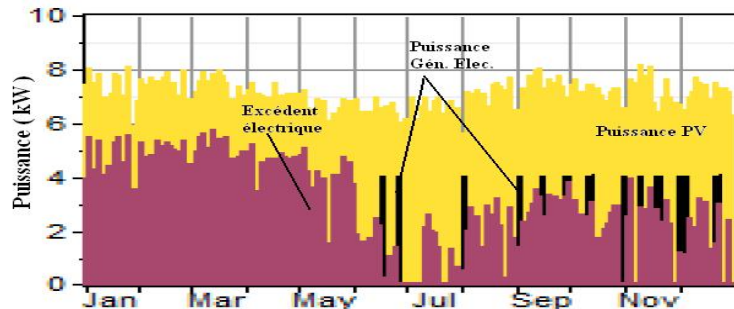


Figure 4.50: Production électrique par les deux systèmes et l'excédent électrique apporté

L'énergie électrique produite par les deux systèmes (photovoltaïque et générateur diesel) est respectivement de l'ordre 97 % et de 3 %. On constate que l'excès d'électricité est de 18.3 %.

Par ailleurs, les histogrammes suivants présentent les divers coûts nets actuels, par les divers composants des systèmes structurés et également le fonctionnement de ces structures, pour Tamanrasset.

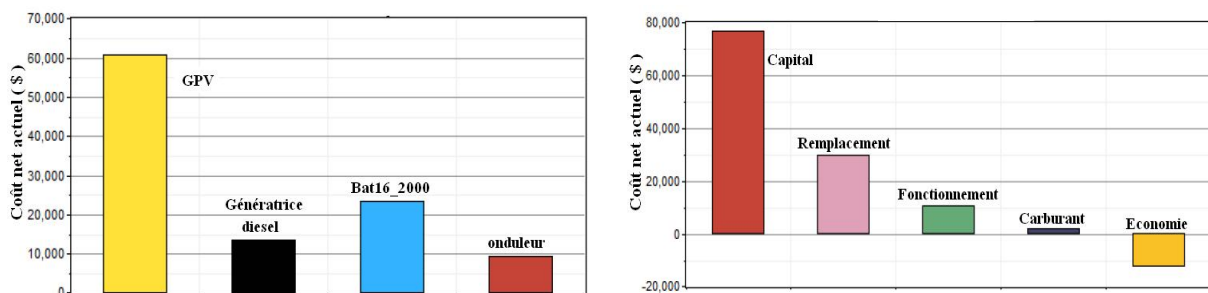


Figure 4.51: Coût net actuel par composant et par structure d'opération – Tamanrasset

Tableau 4.6: Caractéristiques techniques et économiques du système PV/Diesel – **Taman.**

Photovoltaïque / Diesel	
Configuration du système	
Champ de modules photovoltaïques	8.3 kWc
Batterie de stockage	12 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Génératrice Diesel	4 kW
Energie de sortie	

Champ Photovoltaïque	16111 kWh/année
Excès d'énergie	3060 kWh/année
Génératrice diesel	572 kWh/année
Fraction d'Énergie Renouvelable	9.66 %
Utilisation de carburant	190litre/année
Economie en carburant	0 litre/année
Coût	
Investissement	5 537.872 DA
Remplacement et entretien	168 305.586 DA/ année
CAN total	7 653 358.265 DA
Coût d'énergie	53.262 DA/kWh

4.4 Système éolien seul

Nous avons mis à disposition un système hybride composé de plusieurs aérogénérateurs pour alimenter les besoins énergétiques demandés par les ménages se trouvant sur les sites choisis. Pour ce travail, le logiciel **Homer**, ayant traité les données précédentes, a fait des simulations et a présenté des résultats sous la forme de courbes, d'histogrammes,... sur cette architecture de système hybride (système éolien). La répartition journalière de la vitesse du vent au cours de l'année et la densité de probabilité de la vitesse pour les trois sites est représentée par les figures suivantes.

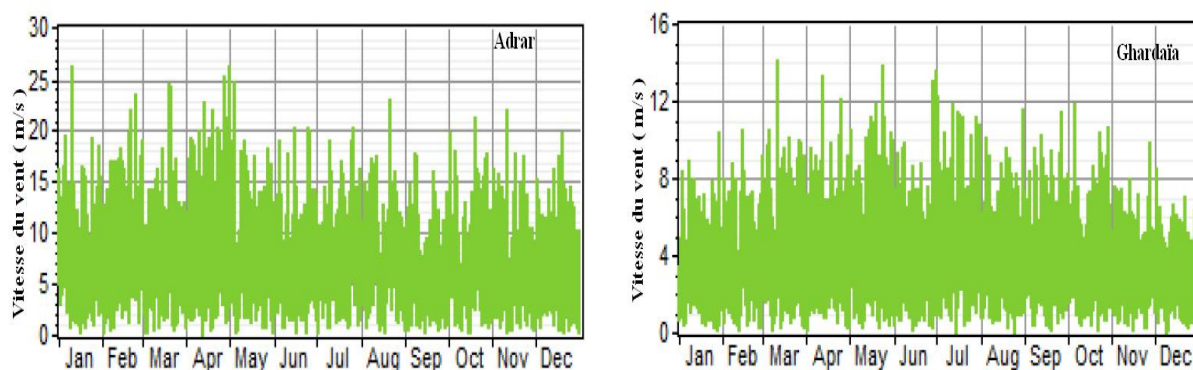


Figure 4.52: Répartition de la vitesse du vent journalière - Adrar et Ghardaïa

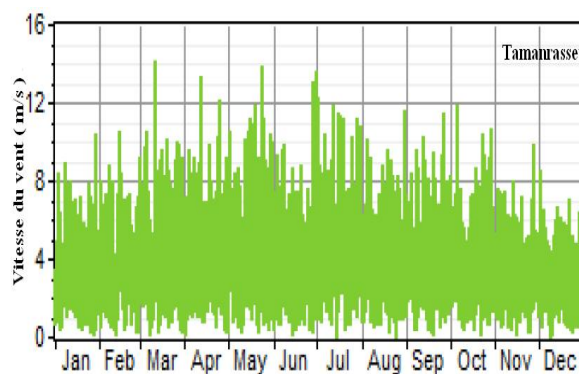


Figure 4.53: Répartition de la vitesse du vent journalière – Tamarasset

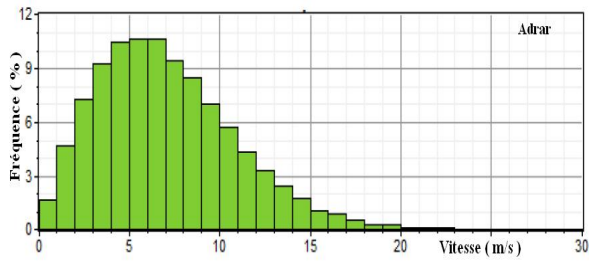


Figure 4.54: Densité de probabilité de la vitesse du vent – Adrar

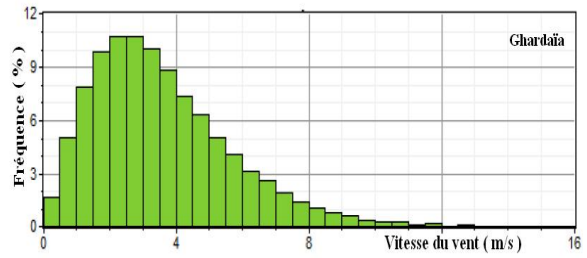


Figure 4.55: Densité de probabilité de la vitesse du vent – Ghardaïa

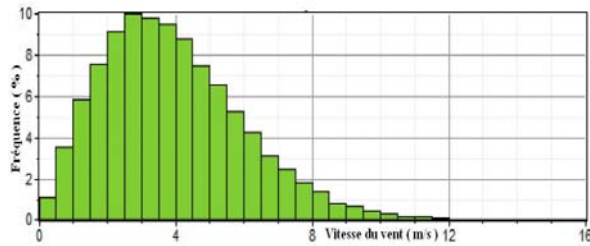


Figure 4.56: Densité de probabilité de la vitesse du vent – Tamanrasset

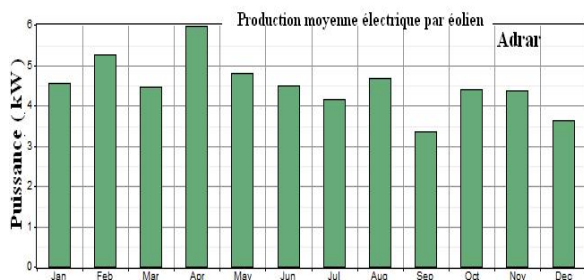


Figure 4.57: Production d'électricité mensuelle par aérogénérateur - Adrar

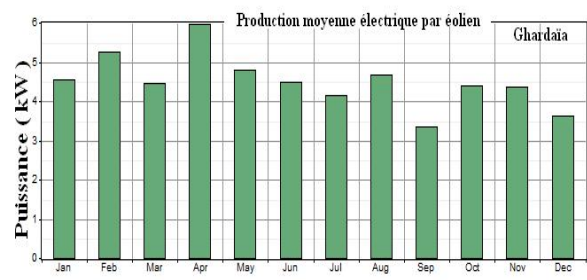


Figure 4.58: Production d'électricité mensuelle par aérogénérateur - Ghardaïa

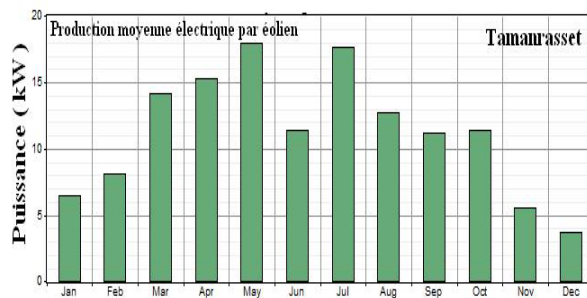


Figure 4.59: Production d'électricité mensuelle par aérogénérateur - Tamanrasset

D'après les figures, la production éolienne est d'environ 6 kW/mois par les 4 aérogénérateurs de 3kW pour le site d'Adrar et de 68 kWh/année par les 15 aérogénérateurs choisis de 20kW pour le site de Ghardaïa, et de 17 kW/mois par les 4 aérogénérateurs de 35kW pour Tamanrasset.

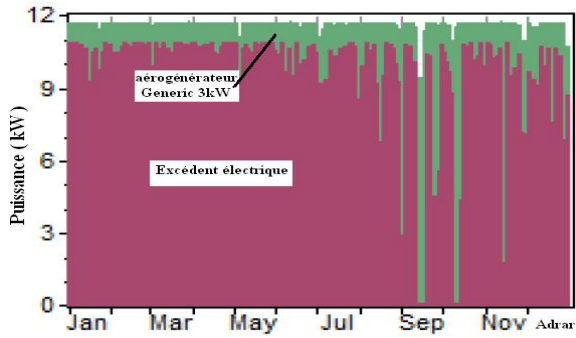


Figure 3.60: Production électrique par éolien et excédent d'électricité - Adrar

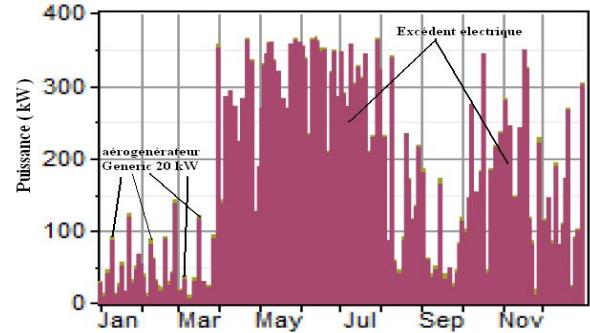


Figure 3.61: Production électrique par éolien et excédent d'électricité - Ghardaïa

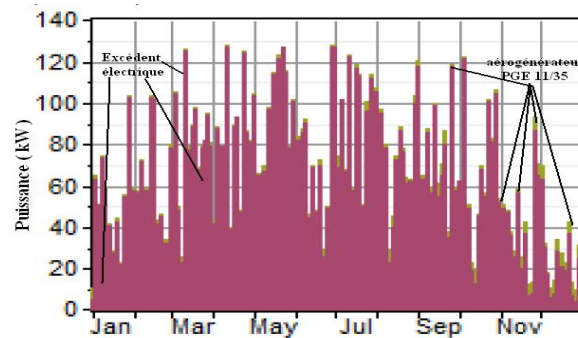


Figure 3.62: Production électrique par éolien et excédent d'électricité - Tamanrasset

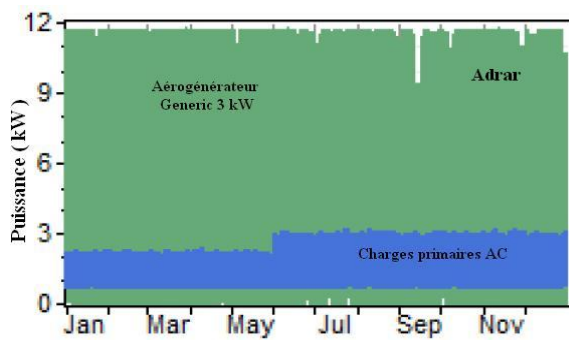


Figure 4.63: Distributions de la charge et des énergies produites par les 4 aérogénérateurs Adrar

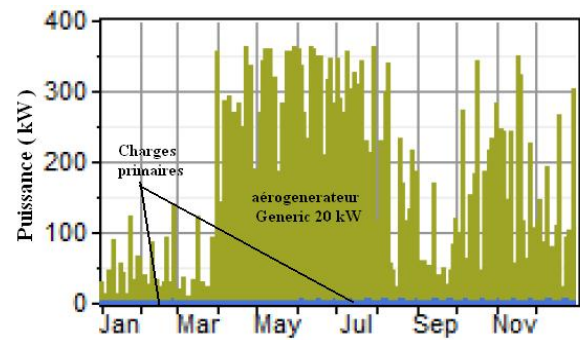


Figure 4.64: Distributions de la charge et des énergies produites par les 15 aérogénérateurs Ghardaïa

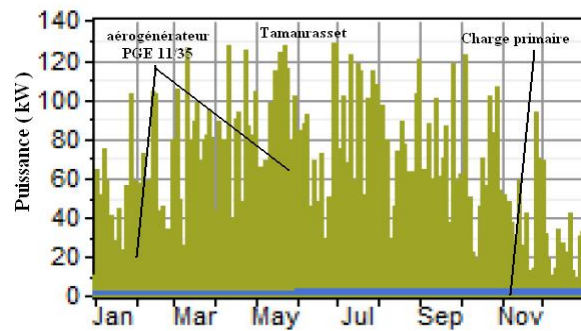


Figure 4.65: Distributions de la charge et des énergies produites par 4 aérogénérateurs - Tamanrasset

Par ailleurs, les histogrammes suivants présentent les divers coûts nets actuels, principalement les composants des systèmes, et de leur fonctionnalité, pour les 3 sites.

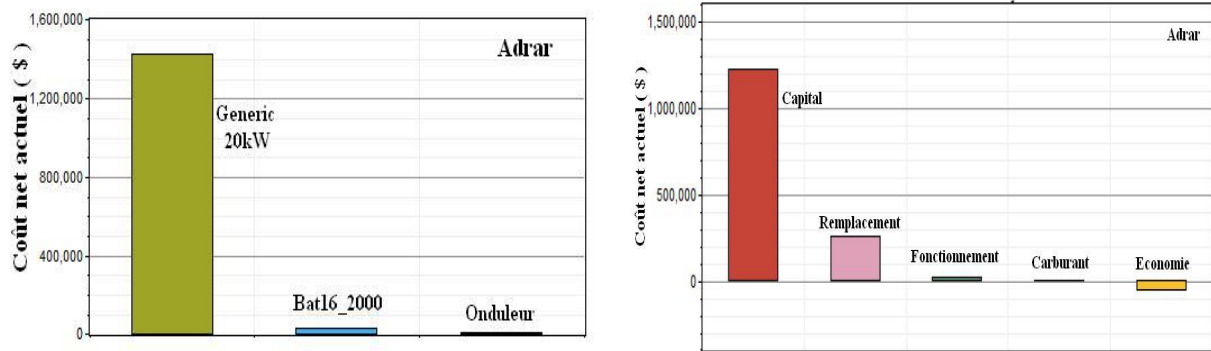


Figure 4.66: Coût net actuel par composant et par structure d'opération – Adrar

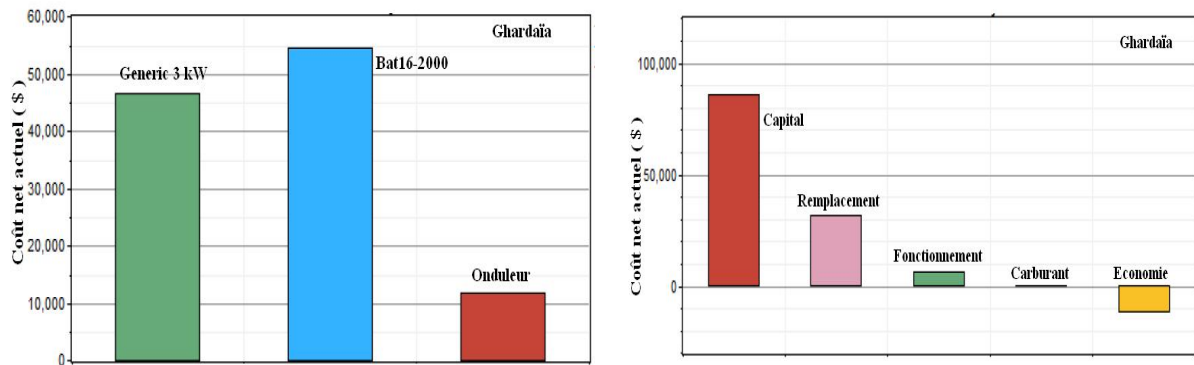


Figure 4.67: Coût net actuel par composant et par structure d'opération – Ghardaïa

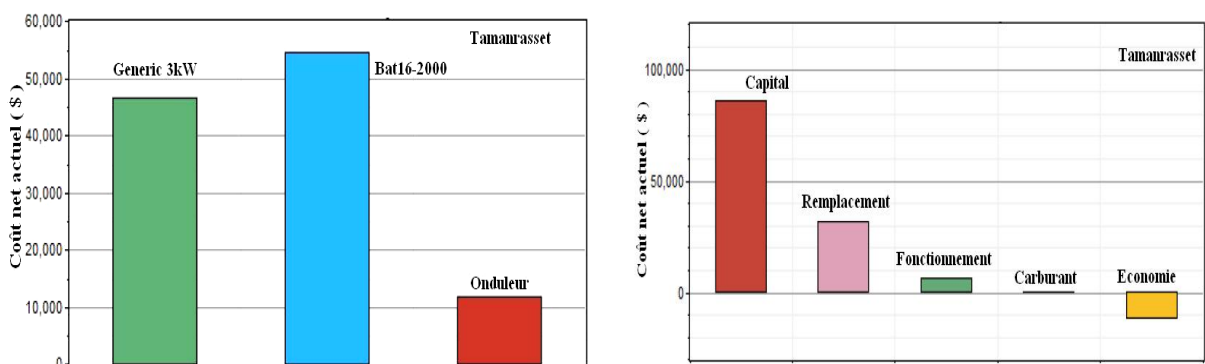


Figure 4.68: Coût net actuel par composant et par structure d'opération – Tamanrasset

Les caractéristiques techniques et économiques de ce système hybride pour chaque site sont résumées sur les tableaux suivants.

Tableau 4.7: Caractéristiques techniques et économiques du système éolien – **Adrar**

Eolien seul	
Configuration du système	
Aérogénérateur	4 x 3 kW
Batterie de stockage	40 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Energie de sortie	
Aérogénérateur	37739 kWh/année
Excès d'énergie	24566 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelable	100 %
Coût	
Investissement	6 197.228 DA
Remplacement et entretien	1554964.929 DA/année
CAN total	8 585 374.609 DA
Coût d'énergie	48.895 DA/kWh

Tableau 4.8: Caractéristiques techniques et économiques du système éolien – **Ghardaïa**

Eolien seul	
Configuration du système	
Aérogénérateur	15 x 20 kW
Batterie de stockage	40 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Energie de sortie	
Aérogénérateur	204393 kWh/année
Excès d'énergie	190815 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelable	100 %
Coût	
Investissement	111 701.592 DA
Remplacement et entretien	1328619.043 DA/année
CAN total	108 817 543.512 DA
Coût d'énergie	620.103 DA/kWh

Tableau 4.9: Caractéristiques techniques et économiques du système éolien – **Taman.**

Eolien seul	
Configuration du système	
Aérogénérateur	4 x 35 kW
Batterie de stockage	60 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Energie de sortie	
Aérogénérateur	99 170 kWh/année
Excès d'énergie	85 984 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelable	100 %
Coût	
Investissement	28 680.199 DA
Remplacement et entretien	711 021.302 DA/année
CAN total	37 581 971.576 DA
Coût d'énergie	261.514 DA/kWh

4.5 Système éolien / diesel

Nous avons mis à disposition un système hybride composé de plusieurs aérogénérateurs et associé une génératrice diesel pour alimenter les besoins énergétiques demandés par les ménages se trouvant sur les sites choisis. Dans cette partie, le logiciel **Homer**, ayant traité les données précédentes, a fait des simulations et a présenté des résultats sous la forme de courbes, d'histogrammes,... sur cette architecture de système hybride (système éolien associé à un groupe diesel).

Site Adrar

La figure 4.69 donne la distribution des charges primaires et des énergies produites par chacun des générateurs éoliens et du groupe diesel pour le site d'Adrar.

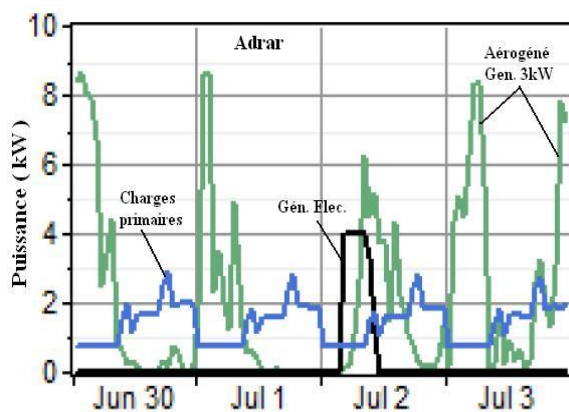


Figure 4.69: Distribution des charges et des énergies produites par l'éolien et le diesel

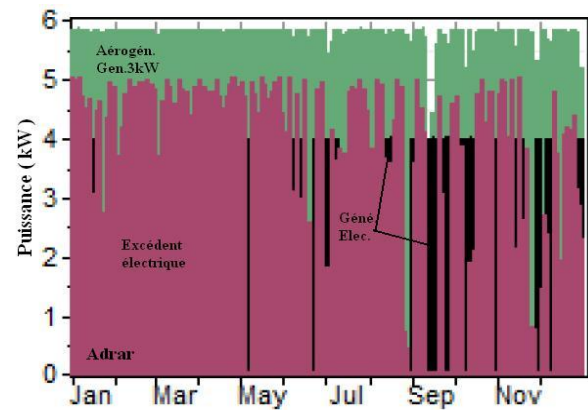


Figure 4.70: Production d'énergie électrique par l'éolien et le diesel

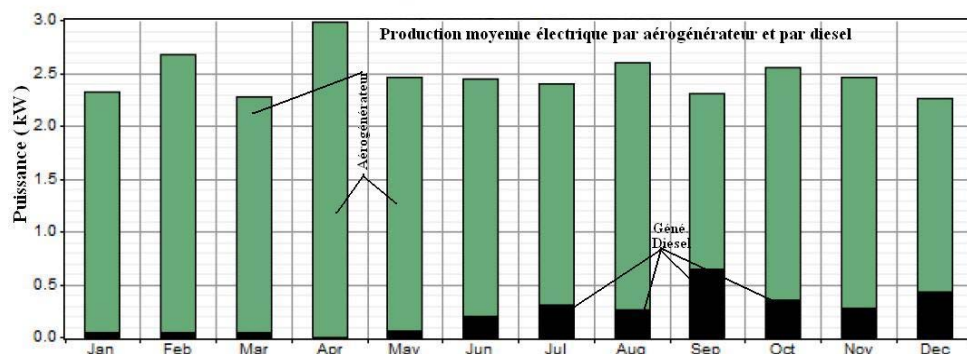


Figure 4.71: Production moyenne mensuelle d'électricité par l'éolien et le diesel – Adrar

La production d'énergie électrique par des aérogénérateurs (éoliens) est de l'ordre de 90% et celle produite par le groupe diesel est de 10%. L'excédent d'énergie électrique est alors de 36,5%.

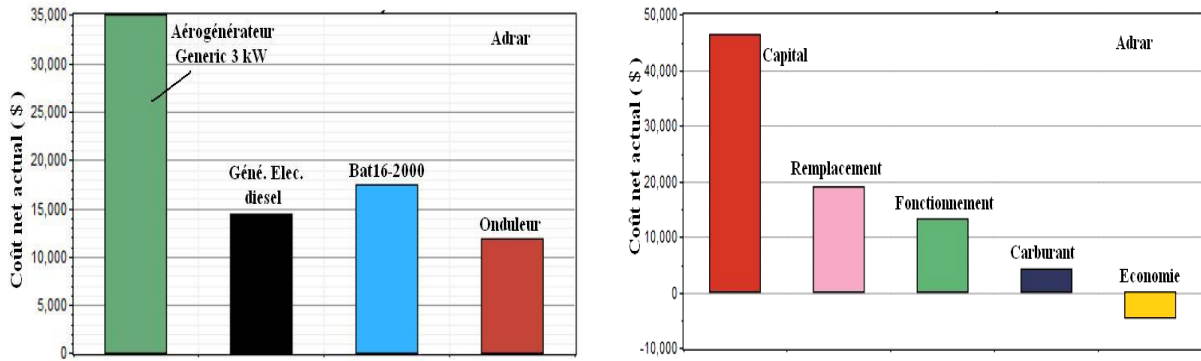


Figure 4.72: Coût net actuel par composant et par structure d’opération – Adrar

Sur le tableau suivant, sont récapitulés l’ensemble des informations d’ordre techniques et économiques concernant le système hybride éolien / groupe Diesel sur le site d’Adrar.

Tableau 4.10: Caractéristiques techniques et économiques du système éolien/diesel – Adrar

Eolien / Diesel	
Configuration du système	
Aéro-générateur	2 x 3 kW
Batterie de stockage	12 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Groupe Diesel	4 kW
Energie de sortie	
Aéro-générateur	18 869 kWh/année
Excès d’énergie	7 690 kWh/année
Groupe Diesel	2 205
Fraction d’Energie Renouvelable	89.5 %
Utilisation de carburant	730 litres/année
Economie en carburant	0 litre/année
Coût	
Investissement	2 767.134 DA
Remplacement et entretien	211 115.769 DA/année
CAN total	6 046 616.21 DA
Coût d’énergie	34.434 DA/kWh

Site Ghardaïa

La figure 4.73 présente la distribution des charges primaires et la production d’énergie électrique réalisée par chacun des générateurs éoliens et par le groupe diesel pour le site de Ghardaïa.

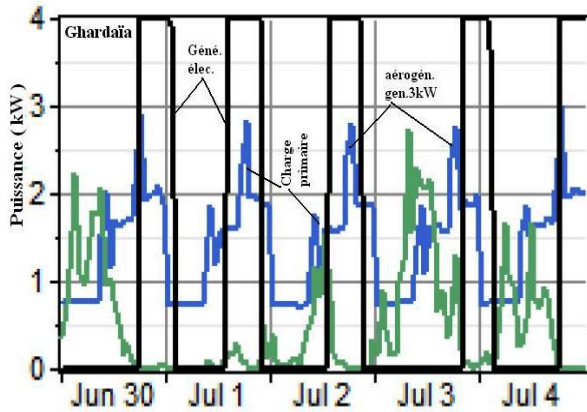


Figure 4.73: Distribution des charges et des énergies produites par l'éolien et le diesel

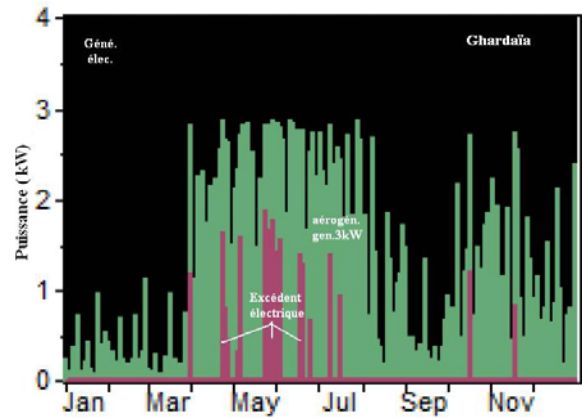


Figure 4.74: Production d'énergie électrique par éolien et diesel, avec excès d'énergie

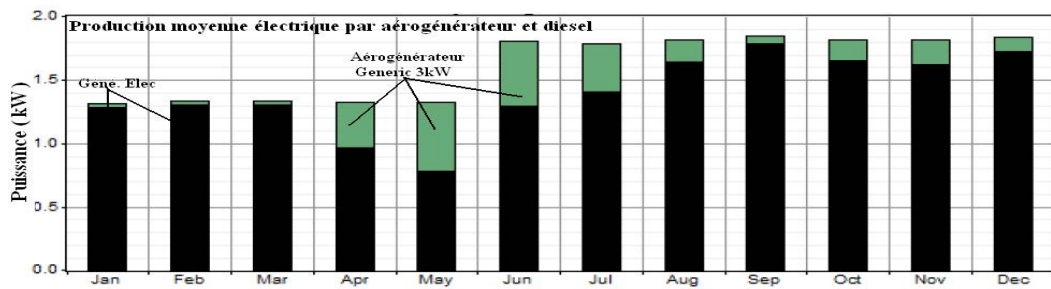


Figure 4.75: Production moyenne mensuelle d'électricité, par éolien et par diesel - Adrar

La production d'électricité par les aérogénérateurs (éolien) est de 13 % seulement, par contre, celle réalisée par le groupe diesel est de l'ordre de 87 %.

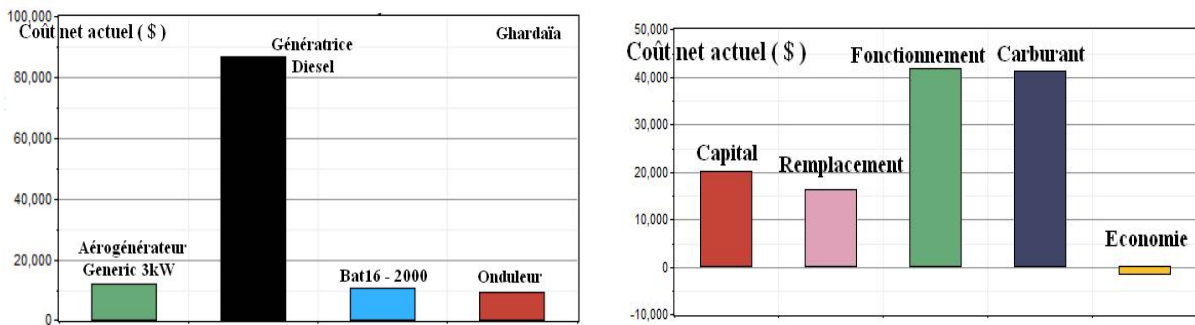


Figure 4.76: Coût net actuel par composant et par structure d'opération – Ghardaïa

Tableau 4.11: Caractéristiques technico économiques du système éolien/diesel – Ghardaïa

Eolien / Diesel	
Configuration du système	
Aérogénérateur	1 x 3 kW
Batterie de stockage	6 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Groupe Diesel	4 kW
Energie de sortie	

Aérogénérateur	1905 kWh/année
Excès d'énergie	74.3 kWh/année
Groupe Diesel	12 234
Fraction d'Énergie Renouvelable	13.5 %
Utilisation de carburant	4044 litres/année
Coût	
Investissement	1 451.016 DA
Remplacement et entretien	493 032.995 DA/année
CAN total	9 144 197.835 DA
Coût d'énergie	52.045 DA/kWh

Site Tamanrasset

La figure 4.77 donne la distribution des charges primaires et la production d'énergie électrique réalisée par chacun des générateurs éoliens et par le groupe diesel pour le site de Tamanrasset.

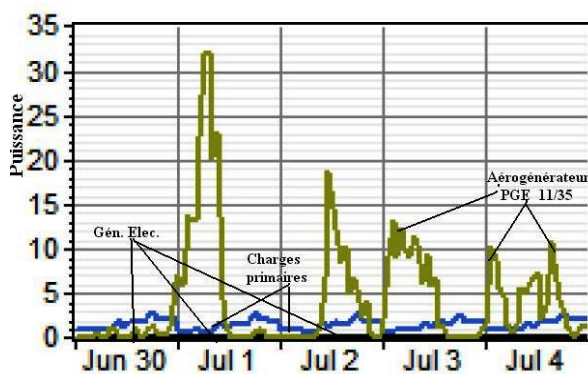


Figure 4.77: Distribution des charges et des énergies produites par l'éolien et le diesel

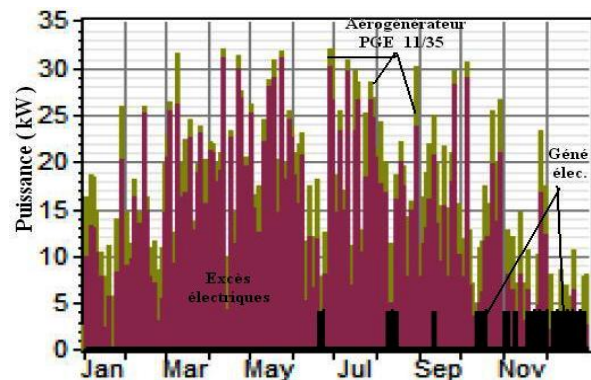


Figure 4.78: Production d'énergie électrique par éolien et diesel, avec excès d'énergie

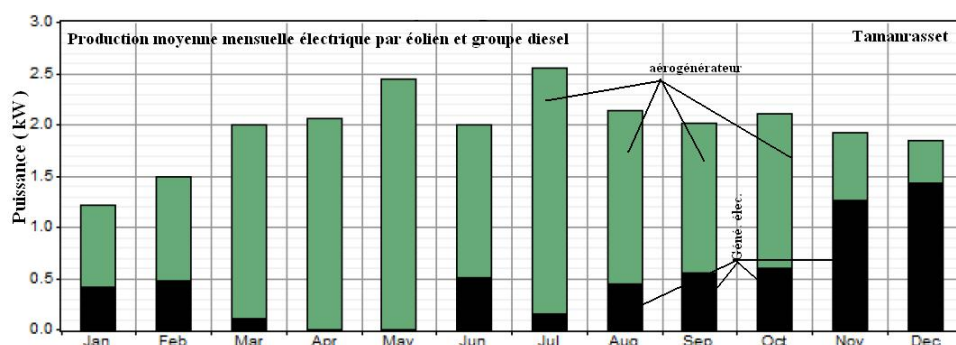


Figure 4.79: Production moyenne mensuelle d'électricité, par éolien et par diesel -
Tamanrasset

La production d'électricité par les aérogénérateurs (éolien) est de 96 % seulement, par contre, celle réalisée par groupe diesel est de l'ordre de 6 %. Sur les histogrammes suivants sont donnés les coûts nets actuels des divers composants du système hybride et aussi des données

relatifs aux coûts des diverses rubriques (capital investi, remplacement des éléments, maintenance et entretien,..).

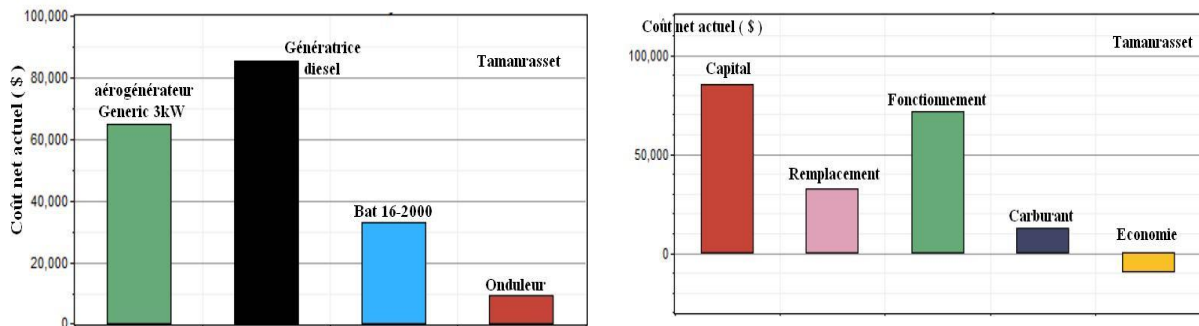


Figure 4.80: Coût net actuel par composant et par structure d'opération – Tamanrasset

Tableau 4.12: Caractéristiques technico économiques du système éolien/diesel – Tamanrasset.

Eolien / Diesel	
Configuration du système	
Aérogénérateur	1 x 35 kW
Batterie de stockage	24 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Groupe Diesel	4 kW
Energie de sortie	
Aérogénérateur	24793 kWh/année
Excès d'énergie	12814 kWh/année
Groupe Diesel	1683
Fraction d'Energie Renouvelable	93.6 %
Utilisation de carburant	568 litres/année
Coût	
Investissement	8 452.732 DA
Remplacement et entretien	396 029.988 DA/année
CAN total	13 459 865.188 DA
Coût d'énergie	93.638 DA/kWh

4.6 Système Photovoltaïque / éolien

Toujours dans le même ordre d'idée, nous avons mis à disposition un système hybride composé de plusieurs aérogénérateurs et de générateur photovoltaïque pour l'alimentation des besoins énergétiques demandés par les ménages se trouvant sur les sites choisis. Dans cette partie, le logiciel **Homer**, ayant traité les données précédentes, a simulé et a présenté des résultats sous la forme de courbes, d'histogrammes,... sur cette architecture de système hybride (système éolien associé à un système photovoltaïque).

Site Adrar

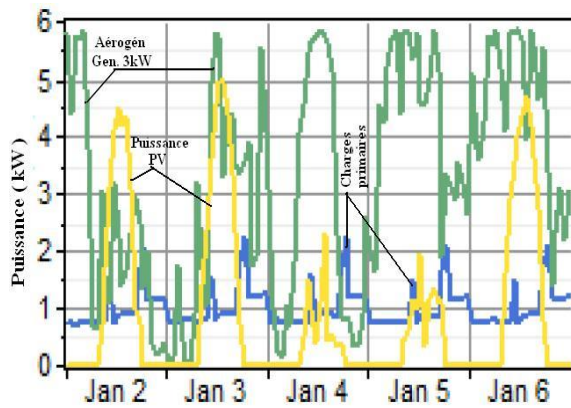


Figure 4.81: Distribution des charges, et production électrique par l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne

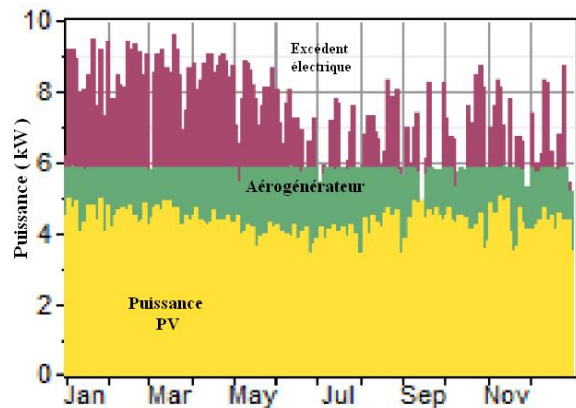


Figure 4.82: Production d'énergie électrique par l'énergie solaire photovoltaïque, l'éolien et le diesel, et avec l'excédent électrique

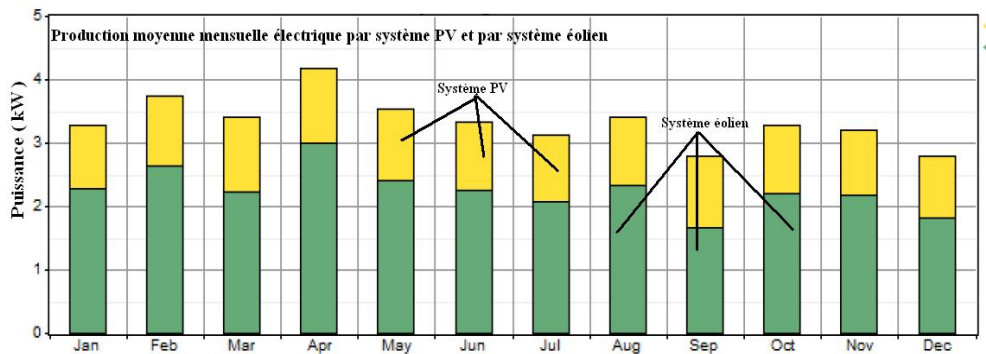


Figure 4.83: Production moyenne d'électricité, par photovoltaïque et par éolien - Adrar

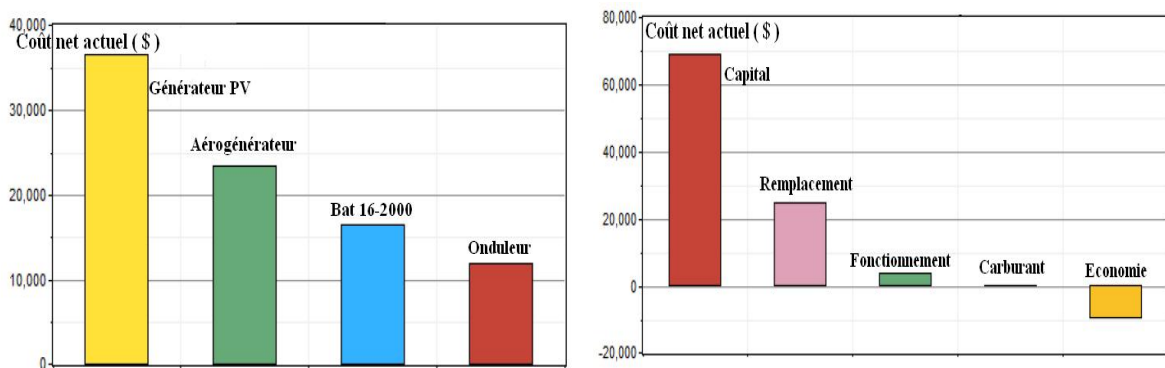


Figure 4.84: Coût net actuel par composant et par structure d'opération - Adrar

On constate que la production d'énergies électrique par éolienne est d'environ 66 %.

Par un générateur photovoltaïque, est de l'ordre 34 %. L'excédent électrique est de 53.9 %.

Tableau 4.13: Caractéristiques technico économiques du système PV/éolien – Adrar

Photovoltaïque / Eolien	
Configuration du système	
Champ Photovoltaïque	5 kWc
Aérogénérateur	2 x 3 kW
Batterie de stockage	12 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Energie de sortie	
Champ Photovoltaïque	9507 kWh/année
Aérogénérateur	18869 kWh/année
Excès d'énergie	15307 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelable	100 %
Coût	
Investissement	4 964.899 DA
Remplacement et entretien	110 207.216 DA/année
CAN total	6 661 207.216 DA
Coût d'énergie	39.088 DA/kWh

Site Ghardaïa

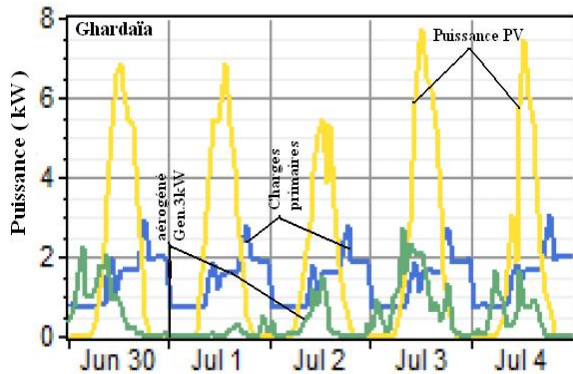


Figure 4.85: Distribution des charges, et production électrique par l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne

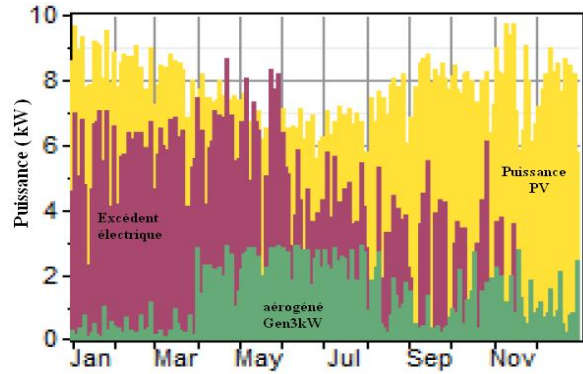


Figure 4.86: Production d'énergie électrique par l'énergie solaire photovoltaïque et par l'énergie éolienne, et excédent électrique

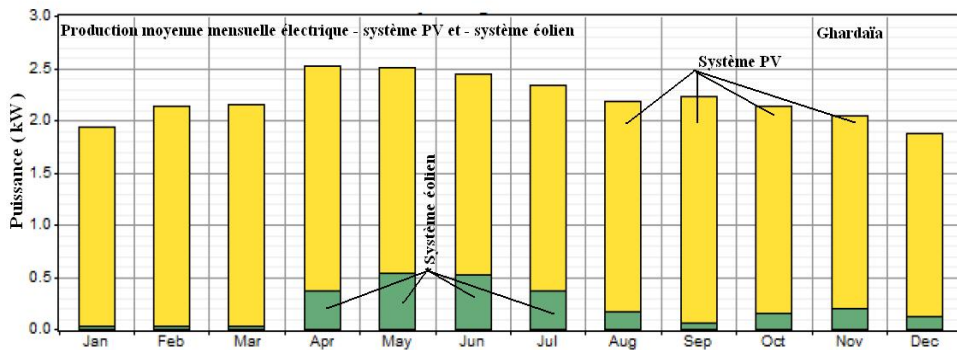


Figure 4.87: Production moyenne mensuelle des deux systèmes éolien et photovoltaïque

Pour le site de Ghardaïa, on constate que l'énergie électrique produite par le système photovoltaïque est 89 %, le reste (11 %) par le système éolien.

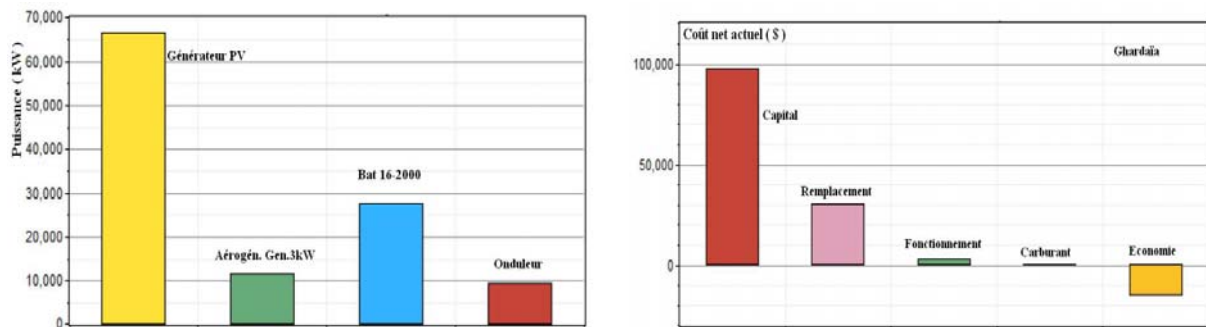


Figure 4.88: Coût net actuel par équipement et par structure d'opération – Ghardaïa

La partie financière relative au coût du système hybride PV/éolien est présentée sur la figure précédente et sur le tableau suivant.

Tableau 4.14: Caractéristiques technico économiques du système PV/éolien – **Ghardaïa**

Photovoltaïque / Eolien	
Configuration du système	
Champ de modules Photovoltaïques	9.1 kWc
Aérogénérateur	1 x 3 kW
Batterie de stockage	40 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Energie de sortie	
Champ Photovoltaïque	14875 kWh/année
Aérogénérateur	1905 kWh/année
Excès d'énergie	4.359 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelable	100 %
Coût	
Investissement	7 008.057 DA
Remplacement et entretien	103 088.066 DA/année
CAN total	8 572 488.601 DA
Coût d'énergie	48.824 DA/kWh

Site Tamanrasset

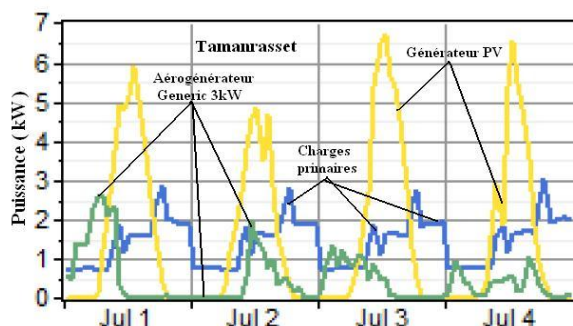


Figure 4.89: Distribution des charges, et production électrique par l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne

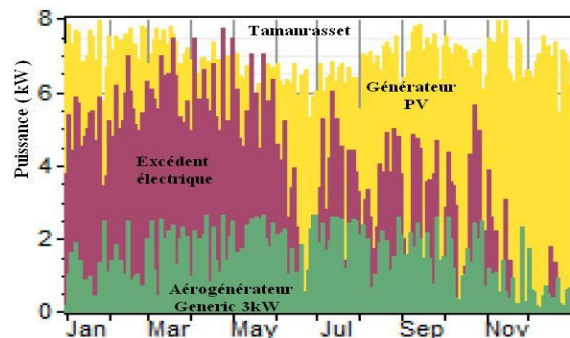


Figure 4.90: Production d'énergie électrique par l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne, et l'excédent électrique

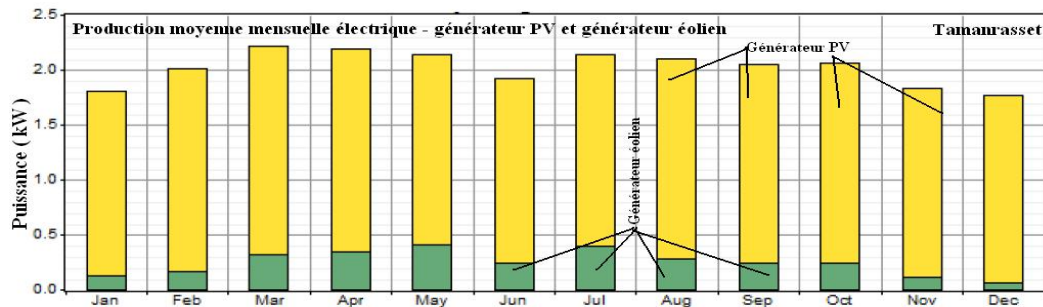


Figure 4.91 Production moyenne mensuelle des deux systèmes éolien et photovoltaïque

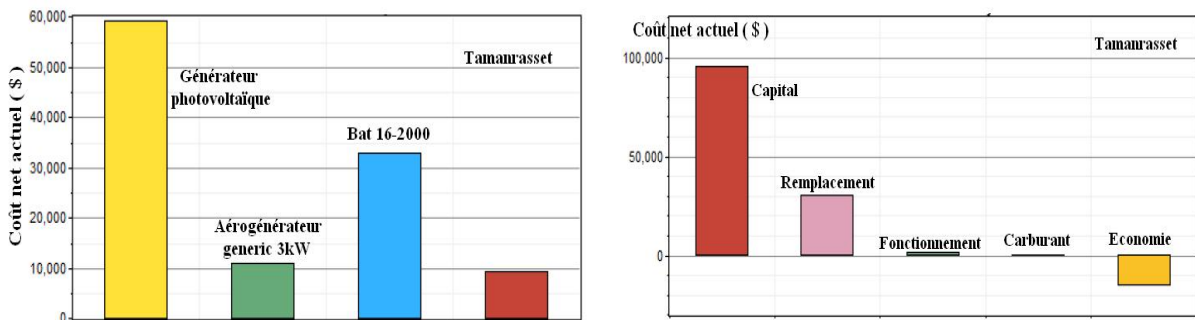


Figure 4.92: Coût net actuel par équipement et par structure d'opération – **Tamanrasset**

L'excès d'énergie est de 24.1 %. La production d'électricité par énergie éolienne est égale à 11% et par énergie solaire photovoltaïque 89 %.

Tableau 4.15: Caractéristiques technico économiques du système PV/éolien – **Tamanrasset.**

Photovoltaïque / Eolien	
Configuration du système	
Champ de modules Photovoltaïques	8.1 kWc
Aérogénérateur	1 x 3 kW
Batterie de stockage	24 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Energie de sortie	
Champ Photovoltaïque	15723 kWh/année
Aérogénérateur	2010 kWh/année
Excès d'énergie	4380 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelable	100 %
Coût	
Investissement	7 008.057 DA
Remplacement et entretien	93 924.683 DA/année
CAN total	8 033 638.688 DA
Coût d'énergie	55.911 DA/kWh

4.7 Système Photovoltaïque /éolien /diesel

Nous donnons respectivement sur les figures suivantes {4.93, 4.94, 4.95}, {4.97, 4.98, 4.99} et {4.101, 4.102, 4.103}, les distributions mensuelles de la charge et des énergies produites

par le système PV/éolien/diesel respectivement pour les divers sites d'Adrar, Ghardaïa et Tamanrasset.

Site Adrar

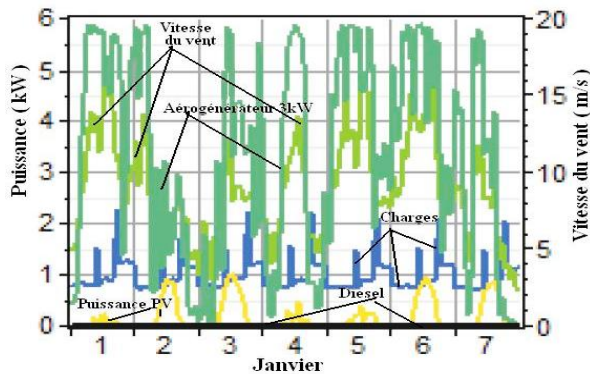


Figure 4.93: Distribution des charges, et production électrique par le solaire, l'éolien et le diesel

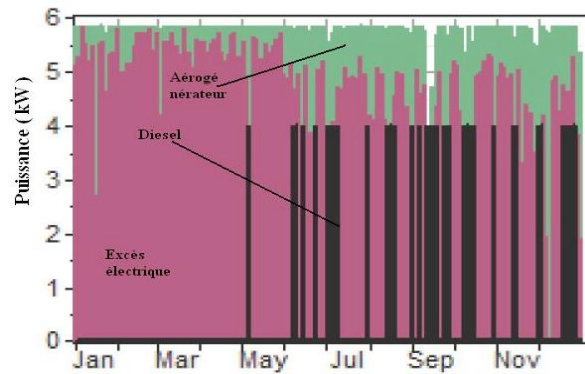


Figure 4.94: Production d'énergie électrique par le solaire, l'éolien, le diesel, et l'excédent électrique

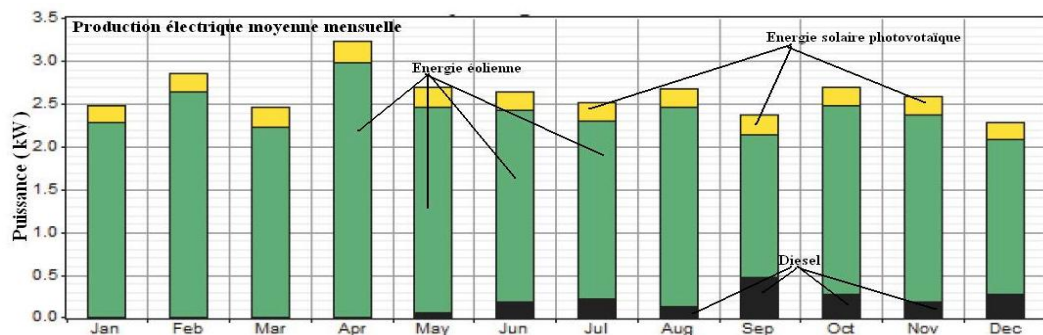


Figure 4.95: Production moyenne mensuelle par les trois systèmes énergétiques

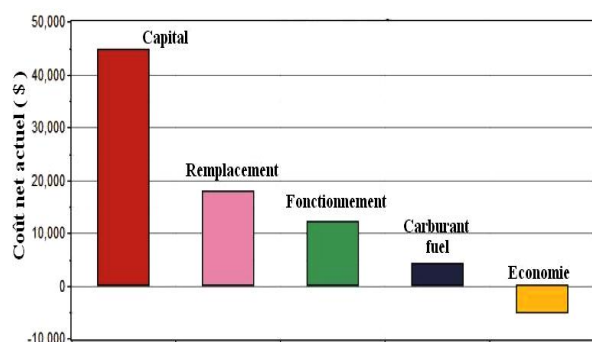
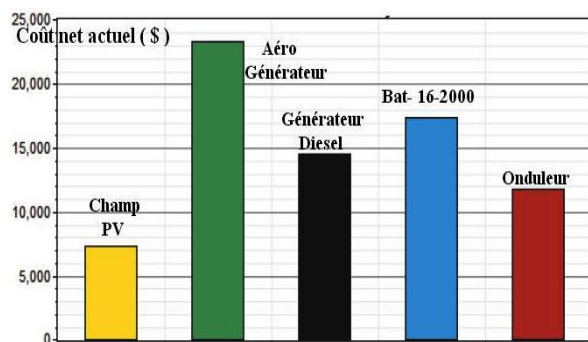


Figure 4.96: Coût net actuel par équipement et par structure d'opération – Adrar

Pour le site d'Adrar on constate que l'excès énergétique est de 41.6 %. La production électrique est égale à 83 % pour l'éolien, 11 % pour le photovoltaïque et 6 % pour le groupe diesel.

Tableau 4.16: Caractéristiques technico économiques du système hybride Photovoltaïque, Eolien et diesel - Adrar

Photovoltaïque / Eolien / Diesel	
Configuration du système	
Champ de modules Photovoltaïques	1.3 kWc
Aérogénérateur	2 x 3 kW
Générateur Diesel	4 kW
Batterie de stockage	12 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Energie de sortie	
Champ Photovoltaïque	2472 kWh/année
Aérogénérateur	18869 kWh/année
Générateur Diesel	1315 kWh/année
Excès d'énergie	4380 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelable	94.40 %
Utilisation du carburant	427 l/année
Coût	
Investissement	DA
Remplacement et entretien	163 509.127 DA/année
CAN total	5 908 091.621 DA
Coût d'énergie	33.647 DA/kWh

Site Ghardaïa

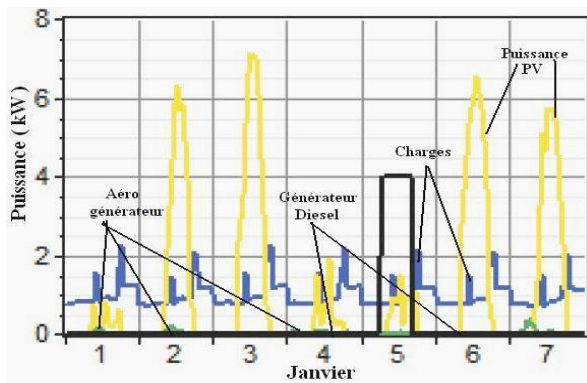


Figure 4.97: Distribution des charges, et production électrique par les trois systèmes, solaire, éolien et diesel

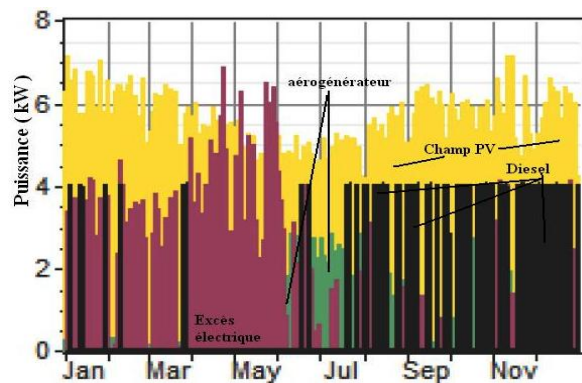


Figure 4.98: Production d'énergie électrique par les trois systèmes, solaire, éolien, diesel, et l'excédent électrique

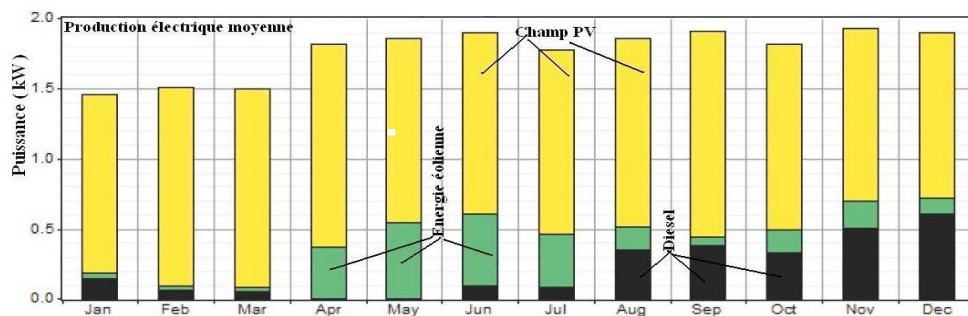


Figure 4.99: Production moyenne mensuelle par les trois systèmes énergétiques

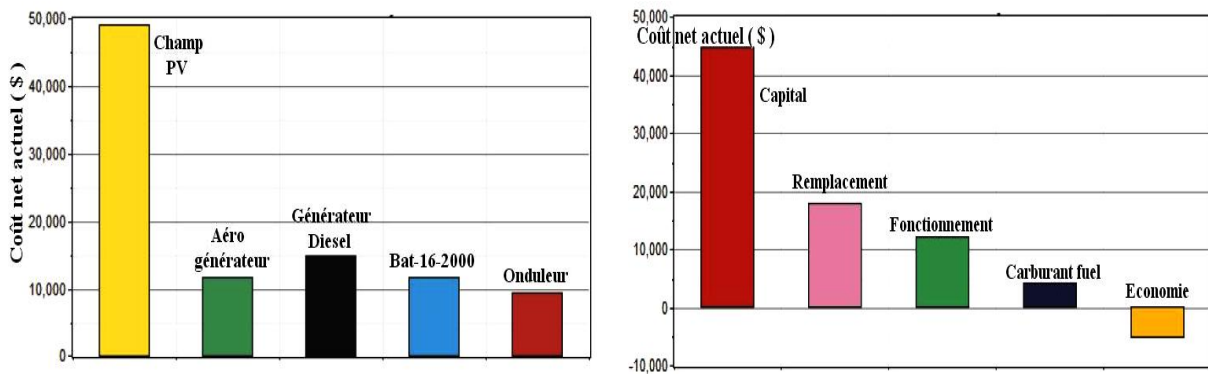


Figure 4.100: Coût net actuel par équipement et par structure d'opération – **Ghardaïa**

Pour le site de Ghardaïa, on constate que l'excès énergétique est de 6,55 %. La production électrique est égale à 13 % pour l'éolien, 75 % pour le photovoltaïque et 12 % pour le groupe diesel,

Tableau 4.17: Caractéristiques technico économiques du système hybride Photovoltaïque, Eolien et diesel - **Ghardaïa**

Photovoltaïque / Eolien / Diesel	
Configuration du système	
Champ de modules Photovoltaïques	6.2 kWc
Aérogénérateur	1 x 3 kW
Générateur Diesel	4 kW
Batterie de stockage	24 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Energie de sortie	
Champ Photovoltaïque	10816 kWh/année
Aérogénérateur	1905 kWh/année
Générateur Diesel	1781 kWh/année
Excès d'énergie	950 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelable	8,77 %
Utilisation du carburant	591 l/année
Coût	
Investissement	DA
Remplacement et entretien	138 739.356 DA/année
CAN total	7 250 169.386 DA
Coût d'énergie	41.307 DA/kWh

Site Tamanrasset

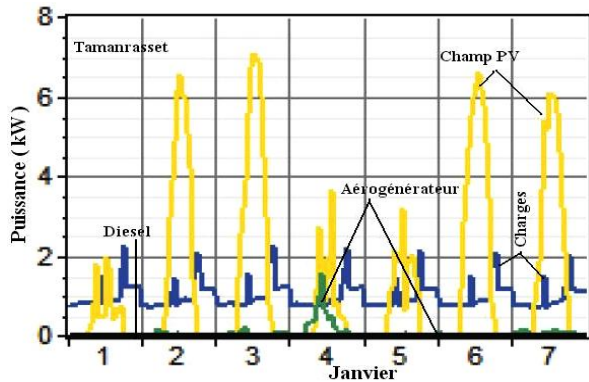


Figure 4.101: Distribution des charges, et production électrique par les trois systèmes, solaire, éolien et diesel

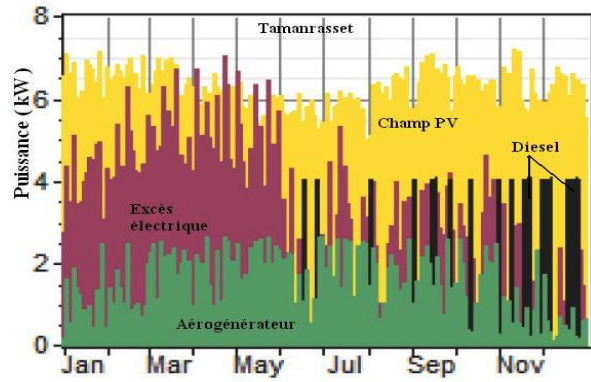


Figure 4.102: Production d'énergie électrique par les trois systèmes, solaire, éolien, diesel, et l'excédent électrique

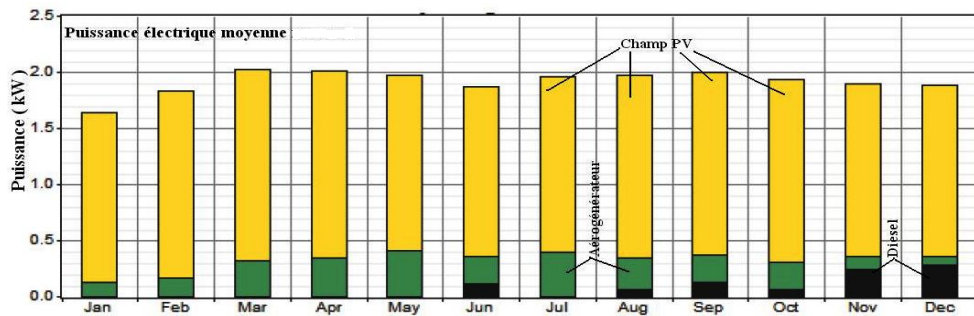


Figure 4.103: Coût net actuel par équipement et par structure d'opération – **Tamanrasset**

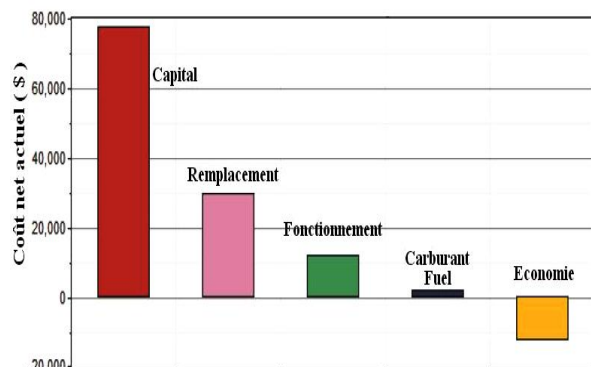
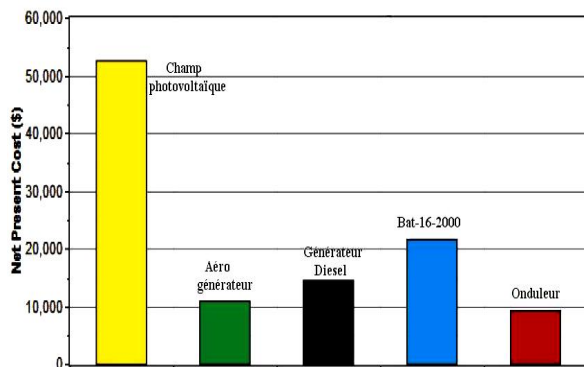


Figure 4.104: Coût net actuel par équipement et par structure d'opération – **Tamanrasset**

Pour le site de Tamanrasset, on constate que l'excès énergétique est de 19,6 %. La production électrique est égale à 12 % pour l'éolien, 14.17 % pour le photovoltaïque et 4 % pour le groupe diesel.

Tableau 4.18: Caractéristiques technico économiques du système hybride Photovoltaïque, Eolien et diesel – **Tamanrasset**

Photovoltaïque / Eolien / Diesel	
Configuration du système	
Champ de modules Photovoltaïques	7.32 kWc
Aérogénérateur	1 x 3 kW
Générateur Diesel	4 kW
Batterie de stockage	12 x 4 kWh
Onduleur	4 kW
Energie de sortie	
Champ Photovoltaïque	14170 kWh/année
Aérogénérateur	2010 kWh/année
Générateur Diesel	636 kWh/année
Excès d'énergie	3296 kWh/année
Fraction d'Energie Renouvelable	9,62 %
Utilisation du carburant	210 l/année
Coût	
Investissement	DA
Remplacement et entretien	177 039.436 DA/année
CAN total	7 871 704.517 DA
Coût d'énergie	54.766 DA/kWh

4.8 Discussion des principaux résultats

D'après le **Tableau 4.19** on constate que le système énergétique optimisé par le modèle Homer pour le site d'Adrar est le système hybride Photovoltaïque / Eolien / Diesel (Coût Actuel Net = 5 908 091.621 DA).

Cela est justifié du fait que le site possède des potentiels énergétiques solaire et éolien satisfaisants. L'apport du générateur Diesel permet une réduction de la taille du champ photovoltaïque et une diminution du nombre d'aérogénérateurs (3 kW) par rapport au système hybride Photovoltaïque / Eolien.

Nous remarquons, également, que ce système hybride (Photovoltaïque/Eolien/Diesel) utilise le même nombre d'aérogénérateurs (2 aérogénérateurs de 3 kW) pour ce même site, mais leurs contributions dans les bilans énergétiques globaux sont différentes, cela est due au fait que le site d'Adrar dispose d'un gisement éolien plus accentué.

Par ailleurs, d'après le **Tableau 4.20**, le système Photovoltaïque / Diesel reste une solution économique optimale pour le site de Ghardaïa (Coût Actuel Net = 7 684 491.835 DA).

Nous pouvons expliquer cela par le potentiel solaire satisfaisant dont elle dispose, en plus du prix du carburant bas.

La couverture des charges primaires par le système ‘Générateur Photovoltaïque seul’ exige une puissance nominale du champ de modules photovoltaïques de 10.5 kWc pour le site de Ghardaïa contre 9.6 kWc pour le site d’Adrar. Ceci est du au fait que le rayonnement solaire incident du mois le plus défavorable (décembre pour les deux sites) est plus élevé pour le site de Ghardaïa que pour le site d’Adrar.

Le système ‘Eolien seul’ utilise 14 aérogénérateurs de 20 kW pour le site d’Adrar et 19 aérogénérateurs de 20 kW pour le site de Ghardaïa pour couvrir les charges respectives. Il faut noter que le potentiel éolien d’Adrar est le plus élevé, alors que le potentiel éolien de Ghardaïa est assez faible.

Le coût de la configuration éolienne seule est égale à 39 998 700 DA, pour Tamanrasset (Coût Actuel Net = 39 998 700 DA). Il est de 84 245 700 DA pour Ghardaïa, quant à Adrar, le coût est de l’ordre de 15 815 240 DA. Le coût de ces configurations est le plus élevé par rapport à ceux des autres configurations, suivi du coût de la configuration Diesel seul qui est pour Tamanrasset d’environ 15 724 590 DA, de 11 411 750 DA pour Ghardaïa et pour Adrar il est de 12 042 450 DA.

Tableau 4.19: Récapitulation des caractéristiques technico-économiques des différentes architectures des systèmes hybrides - **Adrar**

Config. Système	PV S.	Eolien S.	PV/diesel	PV/éolien	Eol/diesel	PV/Eol/Di
Champ PV (kWc)	9.6	-	8.1	5	-	1.3
Aéro Géné. éolien (kW)	-	4 x 3	-	2 x 3	2 x 3	2 x 3
Géné. Diesel (kW)	-	-	4	-	4	4
Nb Bat.	24 x 4	40 x 4	12 x 4	12 x 4	12 x 4	12 x 4
Onduleur (kW)	4	4	4	4	4	4
Invest. (kDA)	7004.309	6197.228	5408.163	4964.989	2767.134	3235.529
Coût Energie (DA/kWh)	57.271	48.895		39.088	34.434	33.647

Tableau 4.20: Récapitulation des caractéristiques technico-économiques des différentes architectures des systèmes hybrides - **Ghardaïa**

Config. Système		PV S.	Eolien S.	PV/diesel	PV/éolien	Eol/diesel	PV/Eol/Di
Configuration du système	Champ PV (kWc)	10.5	-	7.1	9.1	-	6.2
	Aéro Gén. éolien (kW)	-	15 x 20	-	1 x 3	1 x 3	1 x 3
	Géné. Diesel (kW)	-	4	4	4	4	4
	Nb Bat.	40	40	24	40	6	24
	Onduleur (kW)	4	4	4	4	4	4
Invest. (kDA)	7087.323	111701.592	4266.720	7008.057	1451.016	4843.206	
Coût Energie (DA/kWh)	48.036	620.103	39.803	48.824	52.045	41.307	

Tableau 4.21: Récapitulation des caractéristiques technico-économiques des différentes architectures des systèmes hybrides – **Tamanrasset**

Config. Système		PV S.	Eolien S.	PV/diesel	PV/éolien	Eol/diesel	PV/Eol/Di
Configuration du système	Champ PV (kWc)	8.6	-	8.3	8.1	-	7.3
	Aéro Gén. éolien (kW)	-	4 x 35	-	1 x 3	1 x 35	1 x 3
	Géné. Diesel (kW)	4	4	4	4	4	4
	Nb Bat.	24	60	12	24	24	12
	Onduleur (kW)	4	4	4	4	4	4
Invest. (kDA)	6535.914	28 680.199	5 537.872	6 878.203	8 452.732	5 645.963	
Coût Energie (DA/kWh)	52.332	261.514	53.262	55.911	93.638	54.766	

Site Adrar

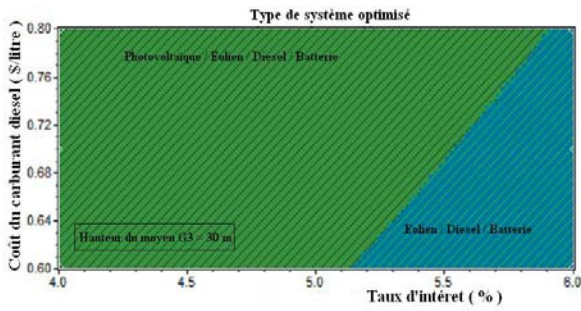


Figure 4.105: Coût de carburant – Taux d'intérêt

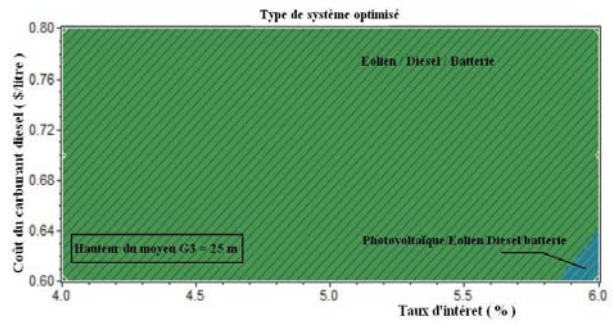


Figure 4.106: Coût de carburant – Taux d'intérêt

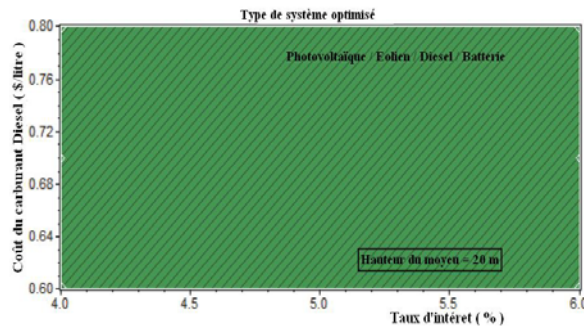


Figure 4.107: Coût de carburant – Taux d'intérêt

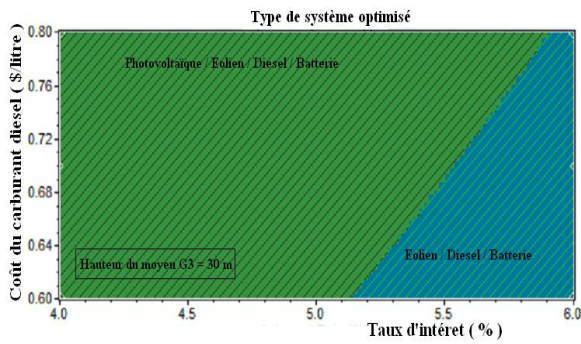


Figure 4.108: Coût du carburant en fonction du taux d'intérêt pour un système optimisé
Hauteur du moyeu = 30 m

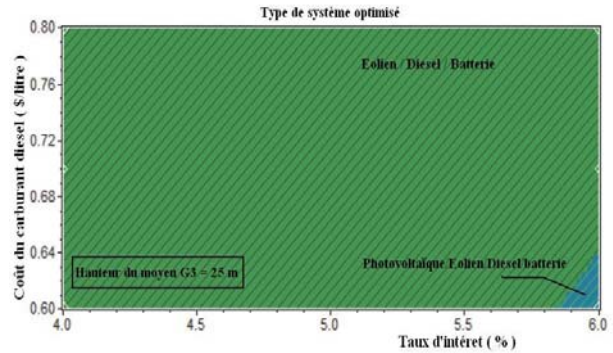


Figure 4.109: Coût du carburant en fonction du taux d'intérêt pour un système optimisé
Hauteur du moyeu = 25 m

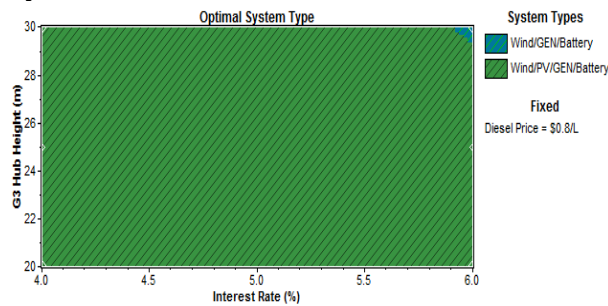


Figure 4.110: Coût du carburant en fonction du taux d'intérêt pour un système optimisé

Hauteur du moyeu = 35 m

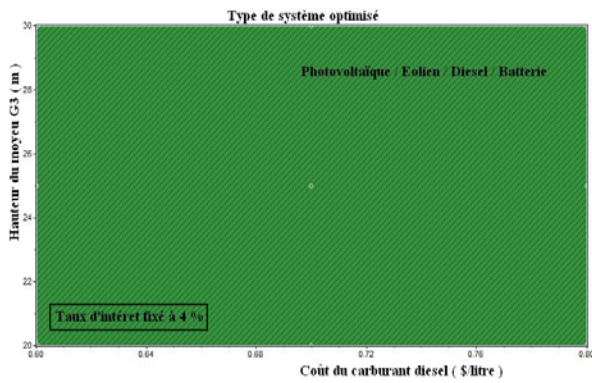


Figure 4.111: Système optimale avec taux d'intérêt 4 %

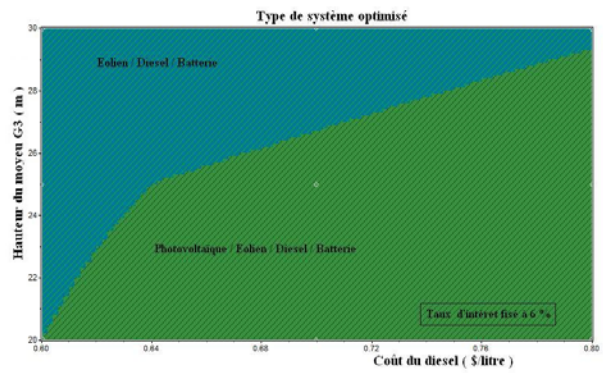


Figure 4.112: Système optimale avec taux d'intérêt 6 %

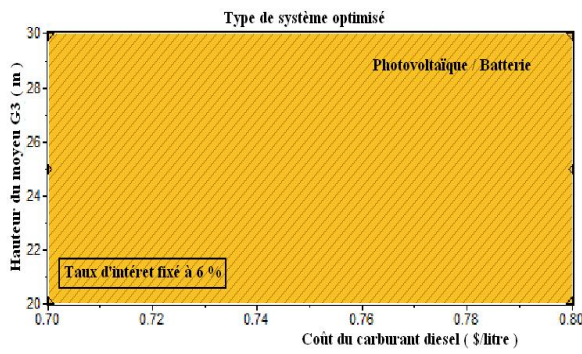


Figure 4.113: Système optimale avec taux d'intérêt 6%

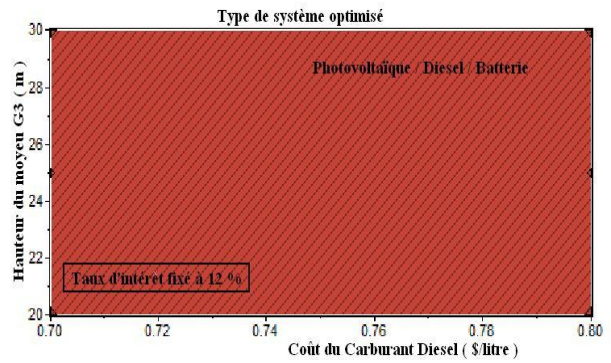


Figure 4.114: Système optimale avec taux d'intérêt 12 %

4.9 Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent des études techniques et économiques des systèmes multi sources d'énergies renouvelables (solaires, éoliennes, et autres) de production d'énergie électrique pour l'alimentation électrique d'un village isolé.

Ces travaux s'inscrivent dans l'objectif de diminuer le coût du système par un dimensionnement optimal des divers systèmes.

L'étude de ces systèmes hybrides pour les villages éloignés, s'avère très délicate, notamment avec le manque de techniques d'optimisation, l'éloignement du site et les conditions environnementales difficiles. L'utilisation d'un logiciel d'analyse reste indispensable et nécessaire.

Le logiciel de simulation s'est avéré un outil important, pour la compréhension du comportement des systèmes hybrides utilisant une source d'énergie renouvelable. Entre autres, cela nous a permis de définir les notions de satisfaction de la demande et de disponibilité des systèmes et de mieux comprendre les facteurs qui les influencent.

Dans ce mémoire on a utilisé le logiciel de simulation **Homer** pour étudier les performances des systèmes hybrides de puissance. Ce logiciel peut optimiser et calculer les paramètres économiques et techniques.

L'étude économique montre clairement l'avantage des systèmes utilisant les énergies renouvelables par rapport aux systèmes fonctionnant à l'énergie conventionnelle, qui présente les contraintes de l'éloignement du réseau électrique, les contraintes du transport du combustible et les entretiens périodiques pour les moteurs diesels.

D'après l'analyse effectuée sur les résultats obtenus, la combinaison des deux sources d'énergie renouvelables reliées à un système d'appoint (génératrice Diesel) engendre un profit énergétique considérable et non négligeable (présence permanente d'énergie électrique) sans qu'il y ait une pénurie dans l'alimentation électrique de diverses charges.

Le potentiel économique des systèmes hybrides est prouvé pour les trois sites choisis. La combinaison photovoltaïque / éolien / diesel s'est avérée la plus économique pour le site d'Adrar, tandis que la combinaison photovoltaïque / diesel reste la plus économique pour le site de Ghardaïa et que la combinaison photovoltaïque seul est la meilleure configuration économiquement pour le site de Tamanrasset.

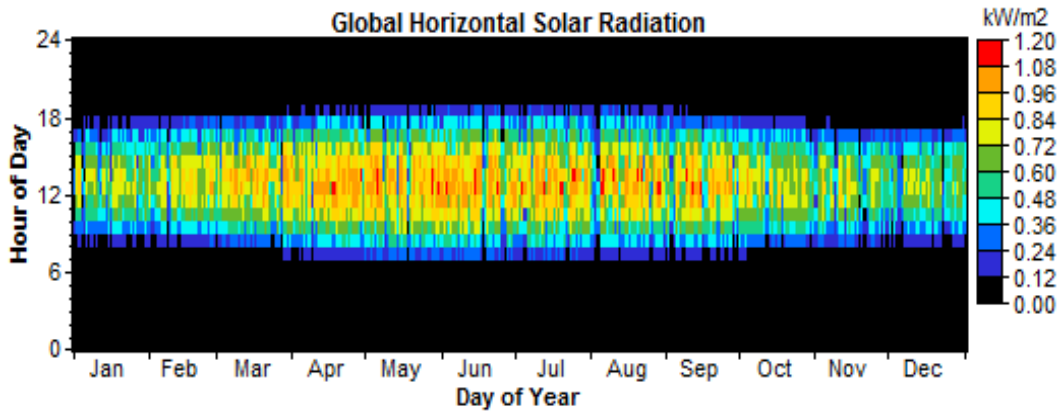
Avec la hausse du coût du pétrole et l'épuisement de ses ressources, les systèmes hybrides d'énergie, utilisant l'éolien, le photovoltaïque et les énergies renouvelables, constituent l'avenir prometteur des technologies d'énergie en Algérie.

Annexe

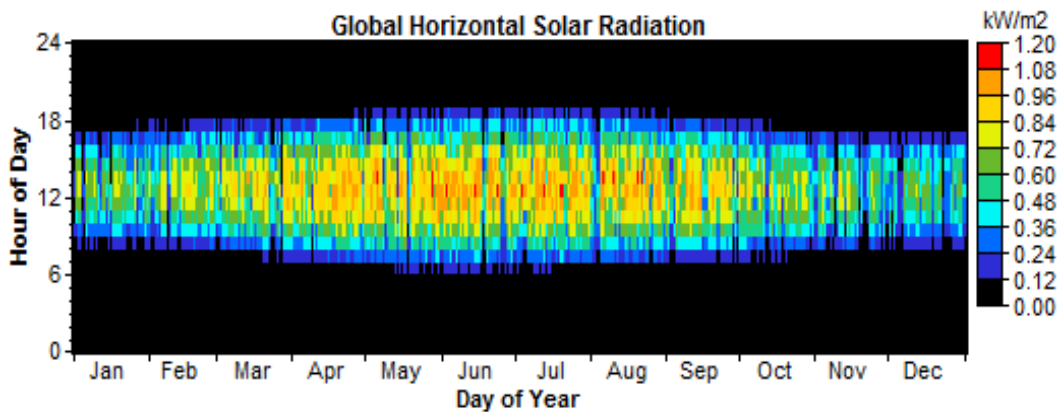
Ressource des données et site d'implantation

1- Le rayonnement solaire global

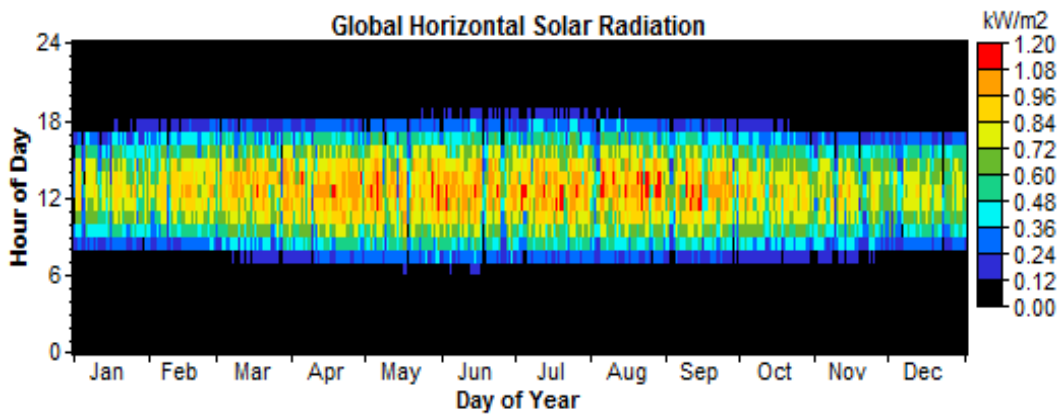
Site Adrar



Site Ghardaïa

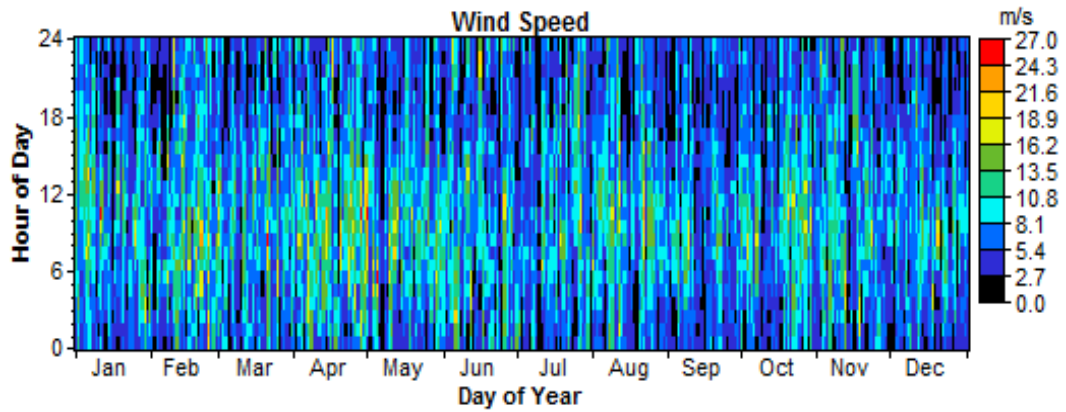


Site Tamanrasset

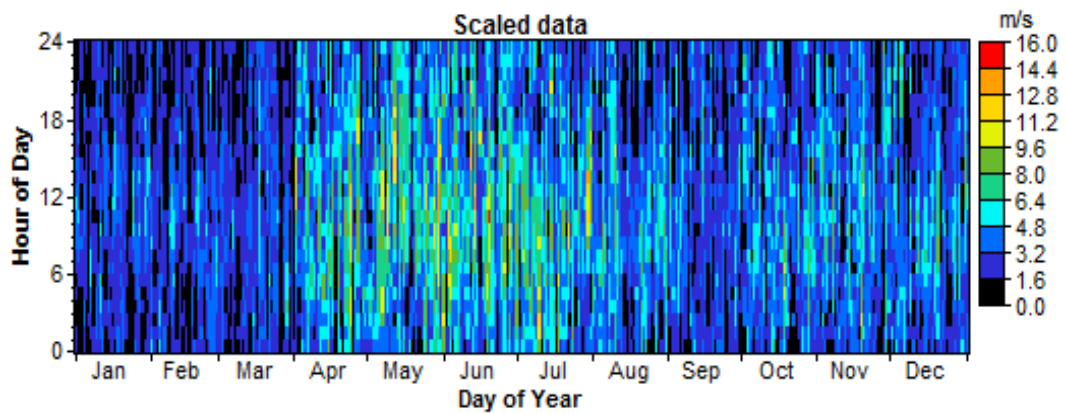


2- la vitesse du vent

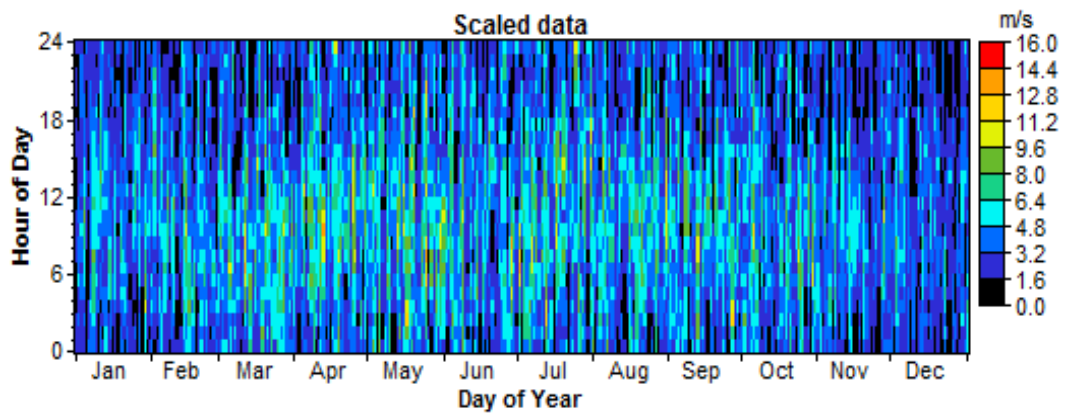
Site Adrar



Site Ghardaïa

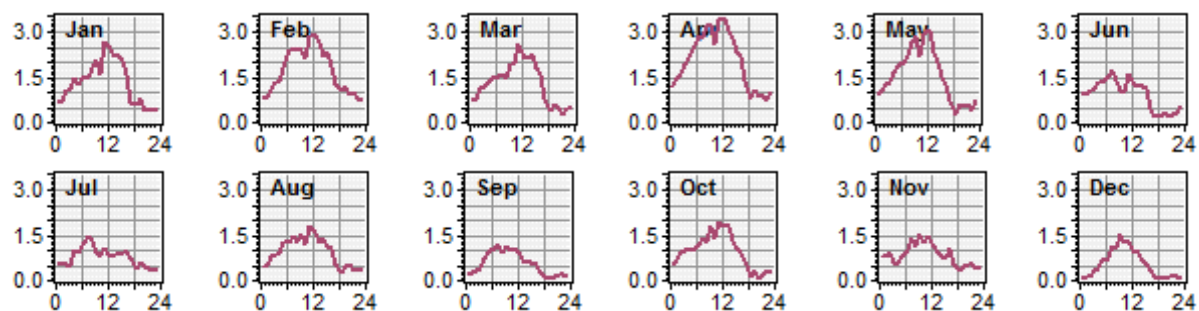


Site Tamanrasset

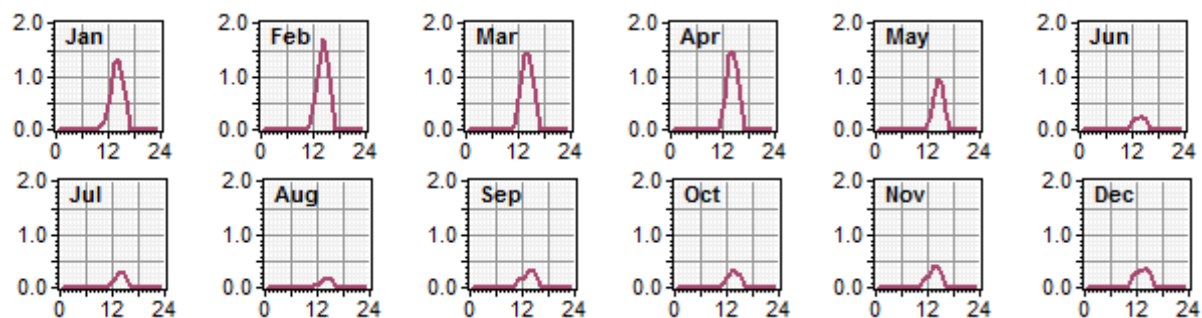


3- Le Profil de la production excédentaire d'électricité par jour

Site Adrar



Site Ghardaïa



Site Tamanrasset

