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

Université Dr. YahiaFarés De MEDEA

Faculté Des Sciences et Technologie

Département de Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de Fin d'Etudes

Présenté pour l'obtention du Diplôme

De Master en Génie Électrique

Spécialité : *énergies solaire et éolienne*

THEME

Optimisation d'un système hybride PV/éolien/micro-hydraulique/diésel par Homer

Préparé par :

MESKINE Ilyes Chouaib

YOUSFI Mohamed

Proposé et dirigé par :

Dr. FERRAI Ahmed

Promotion 2015/2016

ملخص

تقدم هذه الدراسة نظام الطاقة الهجين الأمثل الذي يعطي التكلفة المثلى لإنتاج الطاقة وتتم الحسابات عن طريق برنامج هومر برو. وتقترح هذه الدراسة نموذجا نظام الطاقة الهجين مستقل من خلال النظر في بيانات المترولوجية في منطقة شمال غرب البويرة. ويتضمن النموذج المقترح مصادر كهروضوئية وطاقة الرياح والطاقة المائية في تركيبة مع مولد الديزل. الطبيعة المتقطعة للطاقة الشمسية وطاقة الرياح يؤدي إلى انقطاع التيار الكهربائي بسبب الطاقة الشمسية غير كافية وعدم وجود سرعة الرياح. وبالتالي نعتبر مولدات الديزل أيضا لتوليد الطاقة الكهربائية المستمر. هكذا يشمل نظام الطاقة الهجين مستقل المقترحة الألواح الكهروضوئية، والطاقة المائية التوربينات الصغيرة، ونظام تحويل طاقة الرياح ، مولدات الديزل، محول الطاقة والبطارية للتخزين. وعلاوة على ذلك يتم تحليل أداء النموذج المقترح من خلال ربط حمولة من قرية تتكون من 2000 . يتم أخذ البيانات المترولوجية للمحاكاة في هومر من الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا) والوطني للطاقة المتجددة مختبر (المختبر الوطني) لتحليل أداء النظام. وتبين نتائج المحاكاة مزيج الاقتصادي والتحجيم من مكونات نظام الطاقة الهجين الأمثل الذي يلبي الطلب السنوي على الطاقة

كلمات البحث: الكهروضوئية، الرياح، التوربينات المائية الصغيرة، الديزل، البطارية، والتحليل الاقتصادي، هومر برو.

Résumé

Cette étude présente le système d'énergie hybride optimale qui donne un coût optimal de la production d'énergie. Les calculs sont effectués par Homer Pro. Cette étude propose un modèle hybride de système d'alimentation autonome en tenant compte des données métrologiques dans la région du nord-ouest de Bouira. Le modèle proposé comprend des sources photovoltaïques, éoliennes et hydrauliques en combinaison avec le générateur Diesel. Le caractère intermittent de l'énergie solaire et éolienne conduit à des pannes d'électricité en raison de l'énergie solaire insuffisante et le manque de vitesse du vent. Par conséquent un générateur diesel est également considéré pour la production d'énergie électrique continue. Ainsi, le système proposé de puissance hybride autonome comprend des panneaux photovoltaïques, micro turbine hydraulique, système de conversion de l'énergie éolienne, un générateur Diesel, convertisseur de puissance et la batterie de stockage. En outre, la performance du modèle proposé est analysée en connectant une charge d'un village de 2000 habitations. Les données métrologiques pour la simulation en HOMER est tirée de Aeronautics and Space Administration nationale (NASA) et Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL) pour analyser les performances du système. Les résultats simulés montrent la combinaison économique et le dimensionnement des composants du système hybride de puissance optimal qui répond à la demande d'énergie annuelle.

Mots-clés: PV, vent, micro turbine hydraulique, générateur diesel, batterie, Analyse économique, HOMER Pro.

Abstract

This study presents the optimal hybrid energy system that gives optimum cost of energy production. The computations are done by Homer Pro. This study proposes a standalone hybrid power system model by considering a metrological data in the northwest region of Bouira. The

proposed model includes PV, Wind and hydropower sources in combination with Diesel generation. The intermittent nature of Solar and wind leads to power outages due to insufficient solar energy and lack of wind speed. Hence diesel generator is also considered for continuous electrical power generation. Thus the proposed standalone hybrid power system includes PV panels, micro hydro turbine, Wind Energy Conversion system, Diesel Generator, Power Converter & Battery for storage. Further, the performance of proposed model is analyzed by connecting a load of a village with 2,000 habitations. The metrological data for simulation in HOMER is taken from National Aeronautics and Space Administration (NASA) and National Renewable Energy Lab (NREL) to analyze system performance. The simulated results shows economical combination and sizing of components of the optimal hybrid power system that meets annual energy demand.

Keywords: PV, Wind, micro hydro turbine, Diesel, Battery, Economical Analysis, HOMER Pro.

Je dédie ce mémoire a

Mes parents :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, Ce travail est dédié à mon père Lhaj Mohammed, décédé trop tôt, J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde

Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mes chère amis qu'ils ont me soutien

MESKINE Ilyes chouaib

شُكْرٌ وَتَقْدِير

نتوجه بجزيل الشكر والامتنان إلى كل من ساعدنا من قريب أو من بعيد على انجاز هذا العمل وفي تذليل ما

واجهنا من صعاب، ونخص بالذكر الأستاذ المشرف بجامعة المدية

حميد فراي

الذين لم يبخل علينا بتوجيهاته ونصائحه القيمة التي كانت عونا لنا في إتمام هذا العمل .

ولا ننسى المجهودات لمساعدتنا من طرف

دحماني عبد الله

ثم لا يفوتنا أن نشكر كل اساتذتنا الافاضل وكل من ساعدنا بالقليل او الكثير في مشوارنا الدراسي

في الأخير نقدم تحياتنا الى جميع طلاب طاقات الشمس والرياح ماستر 2 بدون استثناء راجين الله لهم التوفيق

والسداد في الحياة

دفعة 2016/2015

Table des Matières

Introduction général……...01

Chapitre I

Les énergies renouvelables : généralités

I.1 Energie renouvelable

I.1.1 Définition

I.1.2 L'énergie renouvelable en Algérie et au sud Algérien

I.1.3L'énergie photovoltaïque

I.1 .4.1Les types des rayonnements

I.1 .4.1.1 Le rayonnement direct

I.1 .4.1.2 Le rayonnement diffus

I.1 .4.1.3L'albédo

I.1 .4.1.4Le rayonnement global

I .1.4.2Le rayonnement solaire sur notre planète

I.1 .4.2.1Instruments de mesure

I.1 .4.2.2Exploitation de données

I.1 .4.2.3Variations du rayonnement global journalier

I.1 .4 .2.3.1Influence de la latitude

I.1 .4 .2.3.2 Influence de l'exposition

I.1 .4 .2.3.3 Altitude, albédo et autres facteurs

I.1.4.3 Modélisation de l'irradiation solaire globale sur un plan incliné

I.1.4.3.1Déclinaison

I.1.4.3.2 Angle horaire du soleil et angle horaire du soleil à son coucher

I.1.4.3.2.1 L'angle horaire du soleil

I.1.4.3.2.2 L'angle horaire du soleil

I.1.4.4Irradiation solaire directe totale sur une surface inclinée

I.1.4.5Irradiation solaire réfléchie absorbée par une surface inclinée

I.1.4.6.Irradiation solaire diffuse totale absorbée par une surface inclinée

I.1.4.7.Les modèles d'estimation de l'irradiation solaire

I.1.4.7.1 Modèle de Liu et Jordan

I.1.4.7.2Modèle de Hay et Davies

I.1.4.7.3 Modèle de Perez

I.1.4.7.4 Modèle de Reindl

I.1.4.7.5 Modèle de HDKR (Hay et Davies, Klein, Reindl)

I.1.5 Cellule solaire

I.1.5.1 Principe de fonctionnement

I.1.5.2Effet photovoltaïque et la jonction P-N

I.1.5.3 Générateur photovoltaïque

I .2 L'énergie éolienne

I.2.1 Notions théoriques sur l'éolien

I.2.1.1 Les caractéristiques du vent et aérogénérateurs : aspects aérodynamiques

I.2.1.1.1 Puissance récupérable par une turbine

I.2.1.1.2 Distributions de Weibull

I.2.1.1.3 Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur

I.2.1.1.4Différents types d'aérogénérateurs

I.2.1.1.5 Rapport d'énergie produite par rapport la taille

I.2.1.1.6 Composition d'une éolienne à axe horizontal

I.2.1.1.6.1 Rotor

I.2.1.1.6.2 Nacelle

I.2.1.1.6.3 Tour

I.2.1.1.7 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

I.2.1.2 Les Avantages et les inconvénients de l'éolien

I.3 L’énergie Hydraulique

I.3. 1 définition

I.3. 2 Hydroélectricité

I.3.2.1 définition

I.3.3 Catégories de centrales

I.3.3.1 Les centrales gravitaires

I.3.3.2 Les stations de transfert d’énergie par pompage (STEP)

I.3.4 Fonctionnement technique

I.3.4.1 Les barrages

I.3.4.2 les turbines

I.3.5 Enjeux par rapport à l'énergie

I.3.5.1 Rentabilité et prévisibilité de la production

I.3.5.2 Impact social et environnemental

I.3.6 Unités de mesure et chiffres clés

I.3.6.1 Mesure de la puissance hydroélectrique

I.3.6.2 Chiffres clés

I.3.7.1 Passé et présent

I.3.7.2 Futur

I.4 conclusion

Chapitre II

Configurations et dimensionnement des systèmes hybrides

II.1 Introduction

II.2 Description D'un Système Hybride

II.2.1 Principe de fonctionnement

II.2.2 Les differentes configuration d’un système hybride

II.2.2.1 Architecture à bus à cc

II.2.2.2 Architecture à bus mixte à CC/AC

II.2.3 Système hybride PV/groupe diesel

II.2.3.1 Catégories de systèmes hybrides PV/groupe diesel

II.2.3.1.1 Systèmes hybrides PV/Diesel série

II.2.3.1.2 Système hybride PV/Diesel avec interrupteur

II.2.3.1.3 Système hybride PV/Diesel parallèle

II.2.4 Système hybride PV/ diesel /éolien

II.2.4.1 Problème rencontrés dans un système hybride

II .3 Composants d'un système hybride

II.3.1 Générateur photovoltaïque

II.3.2 Onduleur

II.3.3 Régulateur de charge

II.3.4 Batterie

II.3.4.1 Autonomie

II.3.5 Générateur Diesel

II.3.6 Turbine éolienne

II.3.7 La turbine hydraulique

II.4 L'algorithme de conception d'un système Hybride

II .5 La problématique de l'optimisation

II.6 Analyse économique

II.6.1 Coût d'un système multi sources

II.6.2 L'investissement initial

II.6. 3 Coût actualisé net total

II.6.4 Le coût actualisé d'énergie

Chapitre III

Les résultats de simulation

III.1 Présentation de Homer

III.2 Principales caractéristiques

III.3 Architecture de simulation

III.4 Données metéorologiques

III.4 .1 Les données relatives au rayonnement solaire

III.4 .1.1 La variation mensuelle de l'irradiation

III.4.2 Les données relatives à la température ambiante

III.4.3 Les données relatives de la vitesse du vent

III.4.4 Le débit d'eau

III.5 Billant énergétique

III.6 Création du système hybride

III.6.1 Les configurations de notre système hybride

III.7 Production énergétique du système hybride

III.7.1 L'énergie produite par le système PV

III.7.1.1 La relation entre l'énergie produite et le rayonnement incident

III.7.2 L'énergie produite par le générateur diesel

III.7.2.1 Le rapport entre la consommation de carburant et l'énergie produite par le group diesel

III.7.3 L'énergie produite par les turbines éoliennes

III.7.3.1 Le rapport entre la vitesse du vent et l'énergie produite par la turbine éolienne

III.7.4 L'énergie produite par la turbine hydraulique

III.7.4.1 Le rapport entre le débit et l'énergie produite par la turbine hydraulique

III.7.5 L'état de charge des batteries

Liste des figures

Les Energies renouvelables Généralités

Figure I.1: Evolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques en GW 8
Figure I. 2 : Composantes du rayonnement solaire au sol 9
Figure I.3 : Pyranometre 11
Figure I.4 : Pyrhéliometre 11
Figure I.5: Rayonnement global journalier idéal (KWh/m2) 12
Figure I.6: Rayonnement global journalier mesuré dans différentes expositions 13
Figure I.7 : Schéma d'une cellule solaire 19
Figure I 8 : Caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque 20
Figure I 9 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV 21
Figure I 10 : Influence du niveau d'éclairement 22
Figure I 11 : Influence de la température de la cellule (Rayonnement solaire de 1KW/m2) 22
Figure I 12 : Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée λ. 25
Figure I 13: Exemple de la distribution de Weibull 28
Figure I 14: à axe vertical 29
Figure I 15: à axe horizontal 29
Figure I 16: Technologie d'éoliennes de Type à voilure tournante 29
Figure I 17: d'énergie produite par rapport la taille des palles 30
Figure I 18: les composants d une éolienne a axe horizontal 31
Figure I 19: Éléments d'une nacelle 33
Figure I 20 : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent 35
Figure I 21: Principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire 38
Figure I 22: principe de fonctionnement d'une centrale STEP 39

Configurations et dimensionnement des systèmes hybrides

Figure II 2 : configuration à bus cc 46
Figure II 3 : configuration à bus mixte 47
Figure II 4 : configuration d'une Systèmes hybrides PV/Diesel série 48
Figure II 5 : configuration d'une Système hybride PV/Diesel avec interrupteur 49
Figure II 6: configuration dune Système hybride PV/Diesel parallèle 49
Figure II 7: configuration dune Système hybride PV/ diesel /éolien 50
Figure II 7 : Schéma du régulateur shunt 56
Figure II 8 : Schéma du régulateur série 56
Figure II 9 : Schéma du régulateur à sectionnement basse tension automatique 56

Résultats et discussions

Figure III.1 : schéma de l'architecture de simulation de Homer 66
Figure III.2 : la courbe de la puissance produite par la turbine en fonction de vitesse du vent 67
Figure III.3 : le site d'implantation 68
Figure III.4 : le rayonnement solaire global sur le plan horizontal 70
Figure III.5 : Rayonnements solaires global et incident sur un plan PV 71
Figure III.7 : la vitesse mensuelle du vent 72
Figure III.8 : le débit moyen d'eau 72
Figure III. 9 : le profil de charge mensuelle de la première charge 75
Figure III. 10 : le profil de charge mensuelle de la deuxième charge 75
Figure III.11 : diagramme de système hybride simulé par homer 76
Figure III. 12 : la production électrique mensuelle 77
Figure III. 13 : l'énergie produite et la consommation dans une journée typique (01/07/2015) 78
Figure III. 14 : l'énergie produite et la consommation dans une journée typique (28/12/2015) 78
Figure III.15 : La production électrique annuelle par les panneaux solaires 79
Figure III.16 :l'énergie produite par PV et le rayonnement incident 79
Figure III.17 : La production électrique annuelle de générateur diesel 80
Figure III.18 :l'énergie produite par le groupe diesel et la consommation de carburant 81
Figure III.19 : la production annuelle d'électricité par la turbine éolienne 81
Figure III 20:l'énergie produite par la turbine éolienne et la vitesse du vent 82
Figure III.21 : La production électrique annuelle de turbine hydraulique 83
Figure III.22: énergie produite par la génératrice hydraulique/ débit d'eau 83
Figure III.23 : Les résultats statistiques du système de batteries 84

Liste des tableaux

Chapitre I: Les énergies renouvelables : généralités

Tableau (I.1) : Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement 27
Tableau (I.2) : Classification des aérogénérateurs 30

Chapitre II: Configurations et dimensionnement des systèmes hybrides

Tableau II.1 : Inclinaison optimale en fonction de la latitude 54
Tableau II.2 : Coûts de référence des composants 63

Chapitre III: Les résultats de simulation

Tableau III.1 :LES Données géographiques 69
Tableau III.2 :Donneés correspendant au barrage (koudiat asedoune) 69
Tableau III.3 : l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois de l'année sont déterminées 70
Tableau III.4 : exemple d'une consommation journalière d'un foyer. 74
Tableau III .5 Les caractéristiques techniques et économiques de la configuration optimale du système hybride PV/éolien/hydro/Diesel 76
Tableau III.6 : représente les Coûte système 85

NOMENCLATURE

δ : Déclinaison solaire.

ωs **:** L'angle horaire.

G_{in} : L'irradiation solaire totale sur une surface inclinée.

D_{in} **:** L'irradiation solaire diffuse absorbée par la surface inclinée.

R_{in} : L'irradiation solaire totale réfléchie par la surface inclinée.

B_h **:** L'irradiation solaire sur une surface horizontale.

θ **:** L'angle d'incidence.

θ_z **:** L'angle zénithal.

R_b **:** Le facteur géométrique.

φ **:** Latitude.

β **:** L'angle d'inclinaison de la surface de plan.

γ **:** L'angle azimutal de la surface.

G_h : L'irradiation solaire sur une surface horizontale.

ρ **:** L'albédo du sol.

D_h **:** L'irradiation diffuse sur une surface horizontale.

G_0 **:** La valeur horaire sur un jour pris comme jour moyen.

G_{sc} **:** La constante solaire égale à 1376W/m^2.

ε **:** L'éclaircissement du ciel.

m **:** La masse d'air.

I_s **:** Le courant saturation.

$P^c_{max,o}$ **:** Puissance maximale de la cellu

$P^M_{max,o}$ **:** Puissance maximale du module

$V^c_{oc,o}$ **:** Tension du circuit ouvert de la cellule

$V^M_{oc,o}$ **:** Tension du circuit ouvert du module

$I^{c}_{sc,o}$ **:** Courant de court-circuit de la cellule

$I^{M}_{sc,o}$ **:** Courant de court-circuit du module

N_{MS} **:** Nombre de cellules en série

N_{MP} **:** Nombre de cellules en parallèle

$V^{c}_{t,o}$ **:** Tension thermique du semi-conducteur d'une seule cellule

M **:** Facteur idéal

K **:** Constante de Boltzmann**,** k=1,381.10^{-21} J/K

P : puissance en kW.

Q : débit moyen mesuré en mètres cube par seconde.

H : hauteur de chute en mètres.

g : constante de gravité, soit près de 9,8 (m/s2).

r : rendement de la centrale

T^{c}_{o} **:** Température de la cellule aux conditions standard =25°C

E **:** Charge de l'électron e=1,602.10^{-19} C

Voc,o: Tension de circuit ouvert

F **:** Facteur de remplissage

f_0 **:** Facteur de remplissage aux conditions standard

r_s **:** Résistance série

R^{c}_{s} **:** Résistance équivalente de la cellule

V_T **:** La potentielle thermodynamique.

K : La constante de Boltzmann.

T **:** La température effective de la cellule en Kelvin.

e : La charge de l'électron.

n **:** Le facteur de non idéalité de la jonction.

I_{cell} **:** Le courant fourni par la cellule.

V_{cell} **:** La tension à ses bornes.

I_{CC} **:** Le courant de court circuit de la cellule.

Rp **:** La résistance shunt.

R_S **:** La résistance série.

$P^c_{max,o}$ **:** Puissance maximale de la cellule

$P^M_{max,o}$ **:** Puissance maximale du module

$V^c_{oc,o}$ **:** Tension du circuit ouvert de la cellule

$V^M_{oc,o}$ **:** Tension du circuit ouvert du module

$I^c_{sc,o}$ **:** Courant de court-circuit de la cellule.

$I^M_{sc,o}$ **:** Courant de court-circuit du module.

N_{MS} **:** Nombre de cellules en série.

N_{MP} **:** Nombre de cellules en parallèle.

$V^c_{t,o}$ **:** Tension thermique du semi –conducteur d'une seule cellule.

m**:** Facteur idéal

k**:** Constante de Boltzmann**,** $k=1{,}381.10^{-21}$ J/K

ρ : la masse volumique de l'air

Cp : le coefficient de puissance de l'aéromoteur

Pv : la puissance incidente

λ: la vitesse spécifique

α : est le facteur de rugosité.

Vn : vitesse nominale

Vd : la vitesse de démarrage

Vm : la vitesse maximale du vent

P : puissance en kW ;

Q : débit moyen mesuré en mètres cube par seconde ;

H : hauteur de chute en mètres ;

g : constante de gravité, soit près de 9,8 (m/s2) ;

r : rendement de la centrale

C_2 **:** Constante, C_2=0,03Cm2/W

C_3**:** Constante, généralement considérée

$G_{a,o}$**:** Rayonnement, W/m^2

G_a**:** Rayonnement ambiant, W/m^2

T_a**:** Température ambiante, C°

T^c**:** Température de travail de la cellule

I^M **:** Courant total généré par le module

V^M **:** Tension appliquée aux bornes de la cellule

I^A **:** Courant total du champ

M_P **:** Nombre de modules en parallèle

P^A **:** Puissance générée par le champ PV

I^A **:** Courant total généré par le champ PV

V^A **:** Tension appliquée au champ PV

E_{ond} **:** Energie à la sortie de l'onduleur**,** en KWh
E_{PV} **:** Energie généré par le champ PV, en KWh
η_{ond} : Rendement de l'onduleur

E_{bat} : Energie exigée de la batterie par décharge
η_{dech} : rendement de décharge
N_{cel} nombre de cellules en série dans une batterie
V_{dech} : tension moyenne d'une cellule durant la décharge
P_D : profondeur de décharge
N_{bat}: Nombre de batteries en parallèle
$C_{ann,\ tot}$: Coût annuel total.
F_a : Facteur d'actualisation
i : Taux d'intérêt.
N: Durée de vie du système.
Ep : l'énergie produite par le champ photovoltaïque
d : le facteur (derating factor) ; pris égale à 80 %
P_{ch} : La puissance totale du champ photovoltaïque
G_{in} : Le rayonnement solaire global sur un plan incliné

Introduction

De manière générale, l'énergie constitue un facteur structurant de développement social et économique et d'intégration des pays en développement dans le contexte de la mondialisation des échanges pour deux raisons majeures :

- Le coût de l'énergie et la sécurité de l'approvisionnement, par leurs impacts significatifs sur la préservation et le renforcement de la compétitivité des secteurs productifs (agriculture, industrie, services), conditionnent la croissance économique, le développement de l'investissement privé ou encore l'élargissement de la base de l'emploi,
- L'accès généralisé à l'énergie est fondamental pour l'amélioration de la qualité de vie des populations, indicateur clé du niveau de développement de toute société. Les services de base tels que la santé, l'éducation, l'habitat, les transports,… et surtout l'eau ne peuvent être déployés sans un service énergétique approprié et durable.

En raison de cette importance le premier choc pétrolier de 1973 a été un moteur de recherche déterminant pour la mobilisation de ressources énergétiques alternatives en générale et des énergies renouvelables en particulier afin de réduire la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles.

Les préoccupations environnementales mondiales prennent ainsi en considération les énergies renouvelables, de manière réelle et durable car les énergies d'origine fossile sont responsables à près 60 % des émissions de gaz à effet de serre.

Du fait des changements importants qui se sont produits durant ces dernières décennies, le contexte énergétique mondial connaît aujourd'hui de grandes mutations.

Il appelle à une redéfinition des besoins et des modes de consommation, car les risques d'épuisement des ressources non renouvelables tels que le pétrole, le gaz naturel et le charbon largement exploités sont en voie de disparition, faute de nouvelles découvertes. Le réchauffement climatique et les catastrophes nucléaires, récemment sous les feux des médias(1), font apparaître clairement que le modèle énergétique actuel n'est pas durable. Il est donc nécessaire d'engager une transition vers un modèle qui serait plus durable pour les besoins des générations présentes et futures.

Les énergies renouvelables constituent à cet effet l'alternative où le potentiel est important mais largement sous exploité. Pays méditerranéen, l'Algérie dispose encore de grandes ressources en énergies fossiles, mais également un potentiel important en énergies renouvelables : énergie solaire, géothermie, biomasse, énergie éolienne et électricité

hydraulique, que l'on connaît moins. Ce potentiel techniquement exploitable est considérable et la qualité des gisements est telle que les investissements rentables peuvent être considérés pour leur développement. Une utilisation massive des énergies renouvelables peut être envisagée en Algérie, car la part de ces énergies dans le bilan énergétique national est encore très faible et devra augmenter substantiellement à l'avenir.

La tendance en Algérie vers une forte urbanisation et la volonté d'atteindre des taux de croissance élevés, imposés par un accroissement démographique important, augmentera la population algérienne qui sera de l'ordre de 45 millions d'habitants selon les estimations, ce qui indiquera pour les prochaines années un niveau élevé de demande d'énergie, particulièrement pour l'électricité(2). Par ailleurs, la pression environnementale mondiale sur le champ économique et social, exercée à travers les conventions internationales, les normes et les directives contraignantes, particulièrement dans le domaine des énergies fossiles, incite à l'utilisation des énergies renouvelables.

Aujourd'hui, le besoin de développer les énergies renouvelables est devenu de plus en plus urgent ces dernières années, suite à la convention-cadre sur le changement climatique à cause des émissions de carbone dans l'atmosphère. Bien que la convention de Rio de Janeiro sur les changements climatiques ne fasse pas état de la réglementation sur l'énergie, il est évident qu'il n'est pas possible de parvenir à une résolution efficace des problèmes posés par les changements climatiques sans que l'utilisation mondiale de l'énergie ne soit prise au sérieux.

A travers la combinaison de dispositifs de conversion d'énergie renouvelable tels que le panneaux solaire, la turbine éolienne et la turbine hydraulique avec le générateur Diesel et un système de stockage il est possible de produire l'énergie électrique et subvenir d'une manière fiable et efficace aux besoins des populations .Tels systèmes sont définis comme étant des systèmes hybrides et sont utilisés pour remplir la demande d'énergie des populations.

La technologie des systèmes photovoltaïques hybrides est un domaine de R-D d'actualité, car elle offre toute une panoplie de défis et de possibilités aussi bien pour les pays développés que pour ceux en voie de développement. Cette méthode de production d'électricité s'avère être rentable dans les régions ensoleillées et ventées.

L'utilisation de plusieurs sources d'énergie dans un SEH doit avoir une incidence profitable sur la production d'énergie, en termes de cout et de disponibilité, étant entendu que le bilan écologique est supposé à priori favorable. Les moyens de production tels que l'éolien, le photovoltaïque, le petit hydraulique etc…présentent des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes, non corrélées à l'évolution de la charge. Le but premier d'un SEH est

d’assurer l’énergie demandée par la charge et si possible de rendre maximale dans le bilan, la part d’énergie provenant des sources d’énergie renouvelable.

Le dimensionnement d'un système hybride est une phase importante de sa conception. Du moment que le coût 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, de l'autre coté, réduit la fiabilité du système. 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, hydraulique) 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 différents degrés de complexité et de précision suivant la tâche pour laquelle chaque logiciel a été développé.

A cet effet le travail proposé consiste à dimensionner et simuler un système de production d'électricité issu de combinaisons de dispositifs de conversion d'énergie renouvelable (solaire, éolienne, hydraulique) avec un générateur Diesel pour l'alimentation électrique d'un village situé prés du barrage Acerdoune dans la région Nord-Ouest de la Wilaya de Bouira. Le dimensionnement et la simulation se font en utilisant le logiciel Homer.

Le chapitre 1 donne un aperçu sur la modélisation des gisements solaire, éolien et hydraulique, l'aspect théorique et définition de grandeurs physiques utilisées dans la modélisation.

Le chapitre 2 présente les différentes configurations de systèmes Photovoltaïques hybrides, le dimensionnement et l'étude économique de ces différents systèmes.

Le chapitre 3 présente les résultats de dimensionnement et la discussion des principaux résultats obtenus.

En conclusion générale nous présentons une synthèse des travaux effectués ainsi que les principaux résultats obtenus.

I.1 Énergies renouvelables :

Le monde évolue et avec lui des caractéristiques comme l'augmentation de la population, de l'activité industrielle et le changement du style de vie sont indiscutables. La consommation énergétique mondiale augmente sans cesse depuis 40 ans et rien ne laisse présager un ralentissement de cette croissance, surtout dans les pays en voie de développement. La demande d'énergie actuelle peut donc servir de référence et de minorant strict pour évaluer la consommation future. Les ressources énergétiques de la planète se présentent sous deux formes différentes : énergies renouvelables (énergies de flux) et énergies épuisables (énergies de stock). Plus de 90% des consommations commerciales d'énergie sont assurées par les énergies épuisables. Les énergies non renouvelables (pétrole, gaz, charbon, uranium) existent en quantités limitées.

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion des noyaux atomiques qui, éventuellement, pourraient être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont assurés.

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années.

I.1.1 Définition :

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

Les énergies renouvelables utilisent des sources inépuisables d'énergies d'origine naturelle : rayonnement solaire, vents, cycles de l'eau et du carbone dans la biosphère, flux de

chaleur interne de la terre la, effet de l'attraction lunaire et solaire sur les océans. Elles s'opposent ainsi aux énergies fossiles, dont les stocks forcément limités se sont constitués lors de la formation du système solaire (uranium, thorium), ou, au cours des âges géologiques, à partir d'une fraction infime de la biomasse terrestre qui a pu se fossiliser (charbon, pétrole, gaz naturel). Certaines sources d'énergies renouvelables se trouvent d'ailleurs à la charnière de la définition entre énergie de flux et énergie de stocks. Ainsi certains gisements de ressources géothermales peuvent-ils être exploités seulement durant quelques dizaines d'années, alors que leur reconstitution peut prendre un délai bien supérieur. De même, les gisements de tourbe, c'est-à-dire de végétaux en tout début de processus de fossilisation, nécessiteront plusieurs milliers d'années pour être à nouveau exploitables. Enfin, on englobe aussi dans les énergies renouvelables les flux de déchets de l'activité économique qui peuvent donner lieu à une valorisation énergétique : déchets de l'agriculture et de l'exploitation forestière, part combustible ou fermentescible des déchets industriels et des ordures ménagères. [5]

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

Parmi les énergies renouvelables trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,…) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre.

- Le solaire est une utilisation directe des rayons du Soleil pour produire chaleur ou électricité.

- La biomasse recoupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. C'est 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 une origine plus complexe, l'énergie du vent, qui est utilisée d'une 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 du gradient de température terrestre (énergie renouvelable) ou des sources chaudes (énergie non renouvelable). [5]

I.1.2 L'énergie renouvelable en Algérie :

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 trois décennies d'indépendance, malgré la situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. , 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.

Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22.000 MW entre 2011 et 2030 dont 12.000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10.000 MW à l'exportation. L'exportation de l'électricité est toutefois conditionnée par l'existence d'une garantie d'achat à long terme, de partenaires fiables et de financements extérieurs. A la faveur de ce programme, les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par l'Algérie : d'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable. En effet, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir du solaire photovoltaïque et du solaire thermique qui seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance.

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire,

l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. Comparativement, les potentiels en éolien, en biomasse, en géothermie et en hydroélectricité sont beaucoup moins importants. Cela n'exclut pas pour autant le lancement de nombreux projets de réalisation de fermes éoliennes et la mise en œuvre de projets expérimentaux en biomasse et en géothermie.

Le pays 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 régions montagneuses. Des fermes éoliennes sont en projet à Tindouf, Timimoun, Adrar pour 100 MW au total. [5]

I.1.3 L'énergie photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Les panneaux solaires actuels sont relativement onéreux à la fabrication malgré la matière première peu coûteuse et abondante (silice) car une énergie significative est nécessaire à la production des cellules. Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive.

Les panneaux solaires sont très pratiques d'utilisation. L'intégration dans le bâtiment est facile et devient même esthétique. Pour les sites isolés et dispersés qui demandent peu d'énergie, c'est une solution idéale. [1]

La technique photovoltaïque malgré sa complexité est aussi en très forte croissance.

La Figure (I.1) montre l'évolution mondiale de cette ressource qui est en très nette progression depuis le début du siècle (la production est équivalente à la puissance installée).

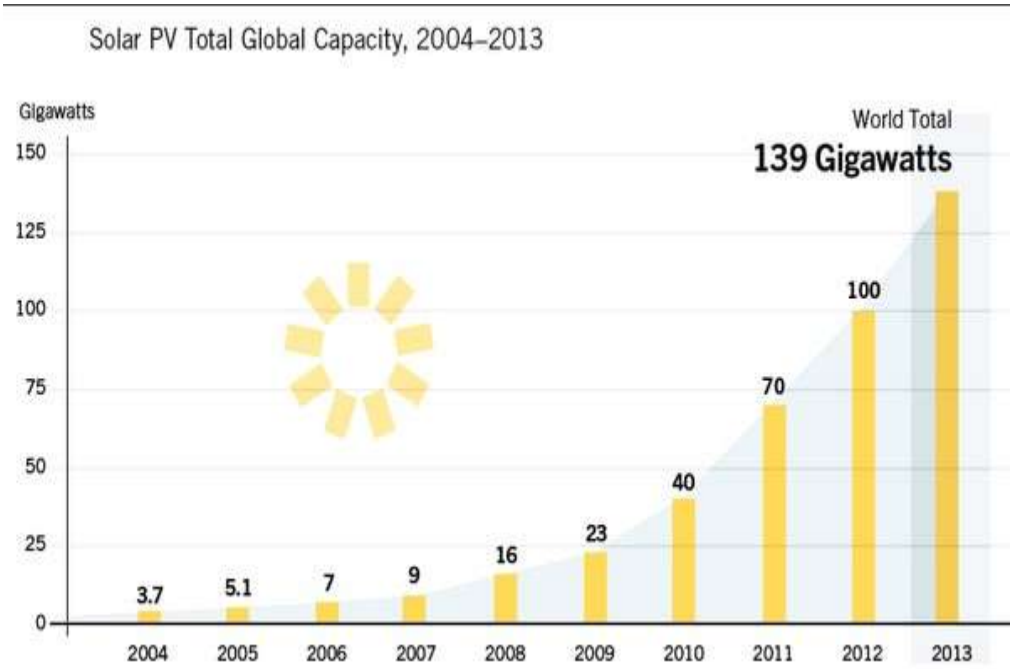


Figure I.1: Evolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques en GW

I.1.4.1 Les types des rayonnements

I.1.4.1.1 Le rayonnement direct : est reçu directement du Soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par les miroirs.

I.1.4.1.2 Le rayonnement diffus : est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols).La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du Soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet que le rayonnement diffus est isotrope, c'est-à-dire que l'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du Soleil (composante appelée circum-solaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.

I.1.4.1.3 L'albédo : est la partie réfléchie par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en

renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

I.1.4.1.4 Le rayonnement global : est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure (I.2).

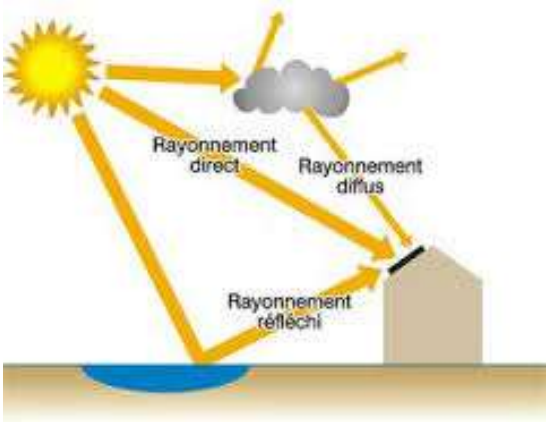


Figure I. 2 : Composantes du rayonnement solaire au sol

I.1.4.2 Le rayonnement solaire sur notre planète :

La modification par l'atmosphère du rayonnement solaire obéit à des phénomènes assez complexes et surtout en grande partie aléatoires. L'état de notre ciel et donc le flux lumineux reçu au niveau du sol à un instant donné dépend d'un grand nombre de paramètres :

- gaz présents dans l'atmosphère.
- nuages.
- albédo.
- température ambiante.
- vent.
- humidité relative.

Or ces paramètres dépendent :

- du lieu géographique.
- de la saison.
- de l'heure de la journée.

- des conditions météo du moment.

Les scientifiques, en particulier les climatologues, élaborent des modèles pour décrire et prédire ces phénomènes atmosphériques, mais le moyen le plus sur pour disposer de données fiables est encore de recourir à des statistiques accumulées sur les années antérieures grâce à des instruments de mesure. Certes le climat évolue et il faudra en tenir compte, mais relativement lentement par rapport aux marges de sécurité que l'on prend de toute façon. [1]

I.1.4.2.1 Instruments de mesure :

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

b-Le Pyranometre : est l'appareil le plus utile puisqu'il évalue, à l'aide d'une thermopile, l'ensemble du rayonnement solaire (direct+diffus) sur une surface donnée, sur un très large spectre, de 0,3 à 3 µm de longueur d'onde. Son globe de verre lui confère une grande acceptance angulaire, proche de la demi-sphère (il collecte les rayons venant de toutes les directions, même les rayons rasants).

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

c-Le pyrhéliomètre *:* quant à lui ne mesure que le rayonnement direct. Egalement équipé d'un système qui suit le Soleil dans ses déplacements, il est muni d'un tube de visée à faible ouverture avec un détecteur placé au fond. [9]

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

accessibles par des logiciels de dimensionnement comme Métronome 2000(version 4), et PVSYST, tous deux conçus en Suisse. Très complète est également la base de données météorologique de la NASA dont une partie est téléchargeable sur le site du logiciel Canadien RETscreen.



Figure I 3 : Pyranometre

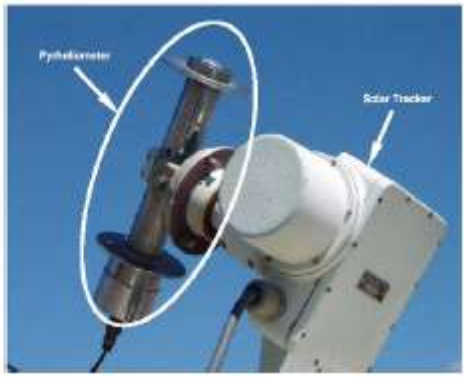


Figure I 4 : Pyrhéliometre

I.1.4.2.2 Exploitation de données :

On distingue deux types de données d'ensoleillement : les valeurs instantanées et les valeurs cumulées.

a-Rayonnement cumulé :

La plupart du temps le dimensionnement d'un système photovoltaïque se base sur les moyennes mensuelles de l'énergie solaire journalière de la région. Il suffit alors de disposer de 12 valeurs journalières cumulées (pour les 12 mois de l'année) dans le plan des capteurs. Plus exactement, la grandeur physique que l'on utilise est alors le rayonnement solaire global intégré sur une journée, appelée plus simplement rayonnement global journalier : il s'agit de l'intégrale du rayonnement global (direct+diffus) sur la journée, le cumul du rayonnement en Wh/m^2 et par jour. Ces valeurs sont accumulées d'année en année et on réalise des moyennes pour chaque mois de l'année.

Comme il n'est possible de disposer des pyranometre dans toutes les directions, les bases de données météorologiques citées ci-dessus fournissent ces valeurs pour seulement quelques orientations et inclinaisons. Parfois seul le rayonnement horizontal est mesuré. Il est possible de calculer, à l'aide de modèles mathématiques et une certaine dose de statistiques, le

rayonnement sur une surface inclinée à partir du rayonnement horizontal, selon la latitude et la longitude du lieu, le cœfficient d'albédo.

b-Rayonnement instantané :

Il existe cependant des cas ou l'on a besoin de profils détaillé du rayonnement instantané pendant la journée : quand il y a des obstacles au voisinage des panneaux solaires susceptibles de provoquer des ombrages pendant plusieurs heures à certaines périodes de l'année. On a besoin alors de données horaires (courbes de l'intensité du rayonnement en fonction de l'heure de la journée) pour quantifier les pertes de ces ombrages. [1]

I.1.4.2.3 Variations du rayonnement global journalier :

I.1.4.2.3.1 Influence de la latitude : On remarque que les sites les mieux ensoleillés se situent dans les régions tropicales (latitudes 25-30°). Les zones équatoriales sont en général plus perturbées par la nébulosité (phénomène de moussons et d'orages).

Mais c'est sur la répartition saisonnière que la latitude a le plus d'influence, surtout sur le rayonnement horizontal. Dans les zones équatoriales et tropicales on observe assez de variations au cours de l'année, ce qui représente un très grand avantage pour l'utilisation du photovoltaïque. Mai plus la latitude s'élève, et plus les différences ne sont marquées. La figure (I.5) montre l'évolution annuelle d'un beau jour selon la latitude. [9]

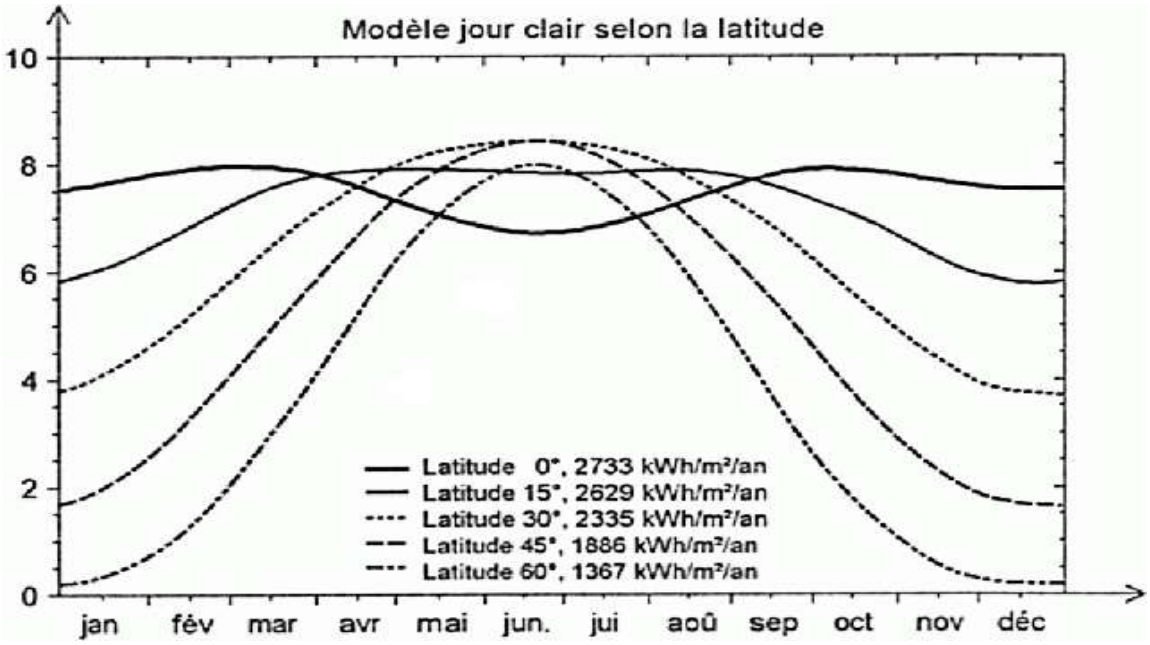


Figure I 5 : Rayonnement global journalier idéal (KWh/m^2)

I.1.4.2.3.2 **Influence de l'exposition :**

Dans les pays tempérés et froids, cette courbe idéale (figure I 6) est encore pénalisée par le fait que la nébulosité est habituellement bien plus élevée en hiver. Ces basses valeurs de l'ensoleillement global hivernal sont certes un inconvénient pour le développement du photovoltaïque en climat tempéré. Heureusement on l'atténue un peu en orientant les modules vers le sud et en inclinant dans une position adaptée à la latitude.

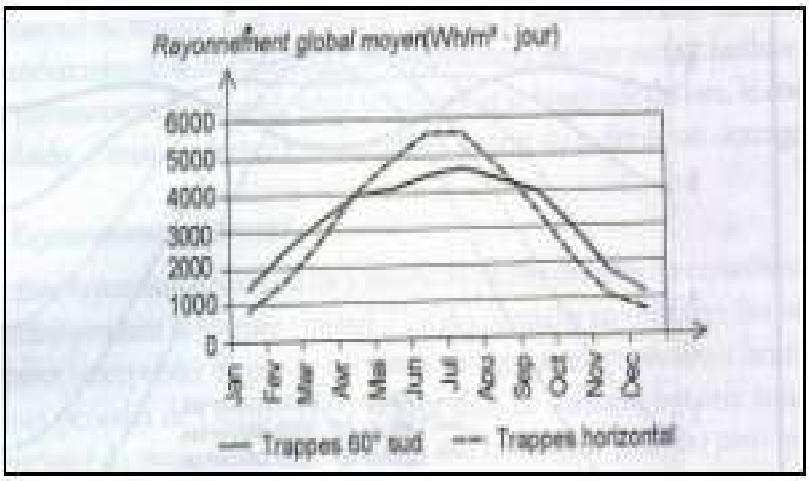


Figure I.6 : Rayonnement global journalier mesuré dans différentes expositions

I.1.4.2.3.3 Altitude, albédo et autres facteurs :

Bien entendu la latitude, la saison et l'exposition sont les principaux facteurs qui déterminent le rayonnement solaire exploitable au sol en un lieu donné. Mais d'autres éléments peuvent intervenir, notamment en montagne, en bordure de mer ou dans les villes ou la pollution atmosphérique est élevée.

En altitude, le rayonnement solaire est presque toujours élevé que dans la plaine à un instant donné. On se trouve fréquemment au dessus de a couverture nuageuse tout simplement. D'une manière générale, la nébulosité baisse avec l'altitude. De même, l'influence de la neige est primordiale en hiver : la réflectivité du sol augmente considérablement. Ce rayonnement venu du sol n'atteint pas les modules à l'horizontale, mais intervient pour toute

exposition inclinée, à fortiori verticale. En ce qui concerne la pollution localisée ou d'autres perturbations qui donnent lieu à microclimats, seules les données météorologiques locales peuvent en rendre compte. [6]

I.1.4.3 Modélisation de l'irradiation solaire globale sur un plan incliné :

Avant d'entrer dans les détails certains principes de base méritent d'être rappelés, notamment la définition de plusieurs variables.

I.1.4.3.1 Déclinaison :

La déclinaison est l'angle que fait le soleil au maximum de sa course (midi solaire) par rapport au plan équatorial.

Sa valeur en degrés, est donnée par l'équation de Cooper :

$$\delta = 23{,}45\mathrm{Sin}\left(2\pi\frac{284+n}{365}\right) \qquad \text{(I.1)}$$

Où *n* est le jour de l'année (c.-à-d. *n* =1 pour le 1er janvier, *n* = 32 pour le 1er février, etc.). La déclinaison varie entre -23,45° le 21 décembre et +23,45° le 21 juin.

I.1.4.3.2 Angle horaire du soleil et angle horaire du soleil à son coucher :

I.1.4.3.2.1 L'angle horaire du soleil : est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'Est en Ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de 15° par heure (un tour de 360° en 24 heures). Ainsi, à 7 h 00 du matin (heure solaire), l'angle horaire du soleil vaut –75° (7 h 00 du matin est 5 h avant midi : cinq fois 15º égal 75º, avec un signe négatif puisque c'est le matin). [9]

I.1.4.3.2.2 L'angle horaire du soleil : à son coucher ω_s est l'angle horaire du soleil à l'heure de son coucher. Il est donné par l'équation suivante :

$$\mathrm{Cos}\omega_s = -\mathrm{Tan}\varphi\mathrm{Tan}\delta \qquad \text{(I.2)}$$

Où δ est la déclinaison calculée d'après l'équation (1-1) et φ la latitude du lieu.

En général l'irradiation solaire totale sur une surface inclinée est calculée par estimation et addition des composantes directes, diffuse et réfléchie de l'irradiation totale sur une surface inclinée et l'irradiation solaire horaire totale sur une surface inclinée est décrite par l'équation :

$$G_{in} = B_{in} + D_{in} + R_{in} \qquad (I.3)$$

Avec G_{in} est l'irradiation solaire totale sur une surface inclinée, W/m^2/heure, B_{in} est l'irradiation solaire directe absorbée par la surface inclinée, W/m^2/heure ; D_{in} est l'irradiation solaire diffuse absorbée par la surface inclinée, W/m^2/heure ; et R_{in} est l'irradiation solaire totale réfléchie par la surface inclinée.

I.1.4.4 Irradiation solaire directe totale sur une surface inclinée :

La partie directe peut être décrite par l'équation :

$$B_{in} = B_h \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} = B_h . R_b \qquad (I.4)$$

Ou B_h est l'irradiation solaire sur une surface horizontale**, θ** est l'angle d'incidence, l'angle que fait l'irradiation directe sur une surface et la normale à cette surface, θz est l'angle zénithal du soleil ;R_b est le facteur géométrique.

Pour le calcul de l'angle d'incidence on utilise les équations suivantes :

$$\mathrm{Cos}\theta = \mathrm{Sin}\delta\mathrm{Sin}\varphi\mathrm{Cos}\beta - \mathrm{Sin}\delta\mathrm{Cos}\varphi\mathrm{Sin}\beta\mathrm{Cos}\gamma + \mathrm{Cos}\delta\mathrm{Cos}\varphi\mathrm{Cos}\beta\mathrm{Cos}\omega_s + \mathrm{Cos}\delta\mathrm{Sin}\varphi\mathrm{Sin}\beta\mathrm{Cos}\gamma\mathrm{Cos}\omega_s$$

$$+ \mathrm{Cos}\delta\mathrm{Sin}\beta\mathrm{Sin}\gamma\mathrm{Sin}\omega_s \qquad \textbf{(I.5)}$$

$$\text{Et} \qquad \mathrm{Cos}\theta z = \mathrm{Cos}\delta\mathrm{Cos}\varphi\mathrm{Cos}\omega_s + \mathrm{Sin}\delta\mathrm{Sin}\varphi \qquad (I.6)$$

Où δ est la déclinaison solaire, φ la latitude du lieu β est l'angle d'inclinaison de la surface du plan ; γ est l'angle azimutal de la surface.

I.1.4.5 Irradiation solaire réfléchie absorbée par une surface inclinée :

La partie réfléchie peut être décrite par l'équation suivante :

$$R_{in} = \frac{\rho}{2} G_h (1 - Cos\beta) \qquad (I.7)$$

Ou G_h est l'irradiation solaire totale sur une surface horizontale et ρ est l'albédo du sol. [1]

I.1.4.6 Irradiation solaire diffuse totale absorbée par une surface inclinée :

Il existe plusieurs modèles pour l'estimation de l'irradiation diffuse totale sur une surface inclinée. On va introduire et expliquer les modèles les plus populaires.

I.1.4.7 Les modèles d'estimation de l'irradiation solaire :

I.1.4.7.1 Modèle de Liu et Jordan :

Le modèle de Liu et Jordan considère une distribution isotropique de l'irradiation diffuse de l'hémisphère. Cette considération permet une dérivation analytique de l'équation de base pour calculer le rapport entre l'irradiation diffuse sur une surface inclinée et sur une surface horizontale.

$$D_{in} = D_h \left[\frac{1 + Cos\beta}{2} \right] = D_h . Cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \qquad (I.8)$$

Où D_h est l'irradiation diffuse sur une surface horizontale.

I.1.4.7.2 Modèle de Hay et Davies :

Le modèle de Hay et Davies tient compte des irradiations diffuses isotropique et de la circum-solaire. Sous les conditions d'un ciel clair, il existe une augmentation de l'irradiation diffuse autour du soleil. Hay et Davies estiment la quantité diffuse de la circumsolaire en utilisant un indice anisotropique A_i.

L'irradiation diffuse sur une surface inclinée est donnée par :

$$D_{in} = D_h . Cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) (1 - A_i) + D_h . A_i . R_b \qquad \text{Où} \qquad Ai = \frac{B_h}{G_0} \qquad (I.9)$$

G_0 est la valeur horaire sur un jour pris comme jour moyen et eut être calculé comme suit :

$$G_0 = \frac{24}{\pi} G_{sc}\left[1 + 0.33\cos\frac{360}{365}n\right]\left[\cos\varphi\cos\delta\sin\omega_s + \frac{\pi\omega_s}{180}\sin\varphi\sin\delta\right] \quad (I.10)$$

Où Gsc est la constante solaire gale à 1376 W/m^2

I.1.4.7.3 Modèle de Perez :

La dernière version améliorée du modèle de Perez (Perez et al, 1990) offre des coefficients recommandés qui sont issus à partie des données climatiques dans plusieurs endroits. Le modèle tient comte, pour les irradiations diffuses de la circum-Solar et isotropiques, des cœfficients empiriques F_1 et F_2 (cœfficient d'éclaircissements réduits).Les cœfficients d'éclaircissement F1 et F2 sont fonction de la clarté du ciel, ε, et les paramètres d'éclaircissement du ciel, Δ :

$$\varepsilon = \frac{\left[\frac{(D_h + D_n)}{D_h + 1{,}04\theta_z^{\,3}}\right]}{1 + 1{,}041\theta_z^{\,3}} \quad (I.11)$$

Où m est la masse d'air.

L'irradiation solaire diffuse sur une surface inclinée est estimée par :

$$D_{in} = D_h.\mathrm{Cos}2\left(\frac{\beta}{2}\right)(1 - F_1) + D_h\left(\frac{a}{c}\right) + D_h.F_2.\mathrm{Sin}\beta \quad (I.12)$$

Avec :
$$\frac{a}{c} = \frac{\max[0, \mathrm{Cos}\theta]}{\max[\mathrm{Cos}85, \mathrm{Cos}\theta_z]}$$

I.1.4.7.4 Modèle de Reindl :

Le modèle de Reindl ajoute un terme de d'éclaircissement diffus du ciel au modèle de Hay et Davies. Le modèle de l'irradiation diffuse sur une surface inclinée est donnée par :

$$D_{in} = D_h.\mathrm{Cos}^2\left(\frac{\beta}{2}\right).(1 - A_i)\left[1 + f.\mathrm{Sin}^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] + G_h.A_i.R_b \quad (I.13)$$

$$\text{Avec } f = \sqrt{\frac{B_h}{G_h}}$$

I.1.4.7.5 Modèle de HDKR (Hay et Davies, Klein, Reindl) :

L'irradiation solaire sur une surface inclinée est donnée par :

$$G_{in} = (B_h + D_h.A_i)R_b + D_h(1 - A_i)\left(\frac{1+Cos\beta}{2}\right)\left[1 + fSin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] + G_h\rho\left(\frac{1-Cos\beta}{2}\right) \qquad (I.14)$$

I.1.5 Cellule solaire :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. [9]

I.1.5.1 Principe de fonctionnement :

La cellule solaire est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles de semi-conducteurs.

I.1.5 .2 Effet photovoltaïque et la jonction P-N :

L'effet photovoltaïque est le phénomène physique qui permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré sur la figure (1.7). Un photon d'énergie suffisante qui heurte un atome peut arracher un électron et lui communiquer une certaine vitesse.

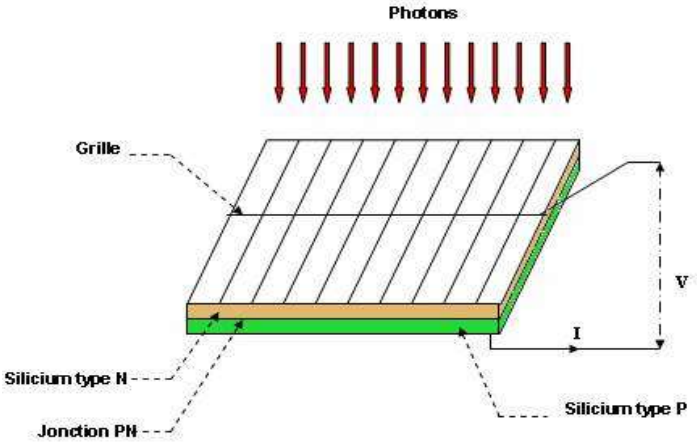


Figure I .7 : Schéma d'une cellule solaire

Ces charges électriques crées ont toute une chance de se recombiner. En constituant une jonction de deux zones de types opposés (jonction P-N), un champ électrique apparaît au voisinage de cette jonction qui maintient la séparation de charges positives et négatives.

L'électron arraché sera accéléré par le champ électrique et parviendra éventuellement dans la zone de type N, de même la charge positive acquise par l'atome se propagera vers la zone de type P.

Ainsi, une tension électrique apparaît entre les deux phases de la jonction et si elles sont reliées par un circuit extérieur, un courant s'y écoulera. L'énergie des photons est ainsi convertie en énergie électrique. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{CC}) et dépend fortement du niveau d'éclairement. Une cellule PV a, comme nous le voyons sur la figure (1.8), une caractéristique I (V) non linéaire avec un point de puissance maximale.

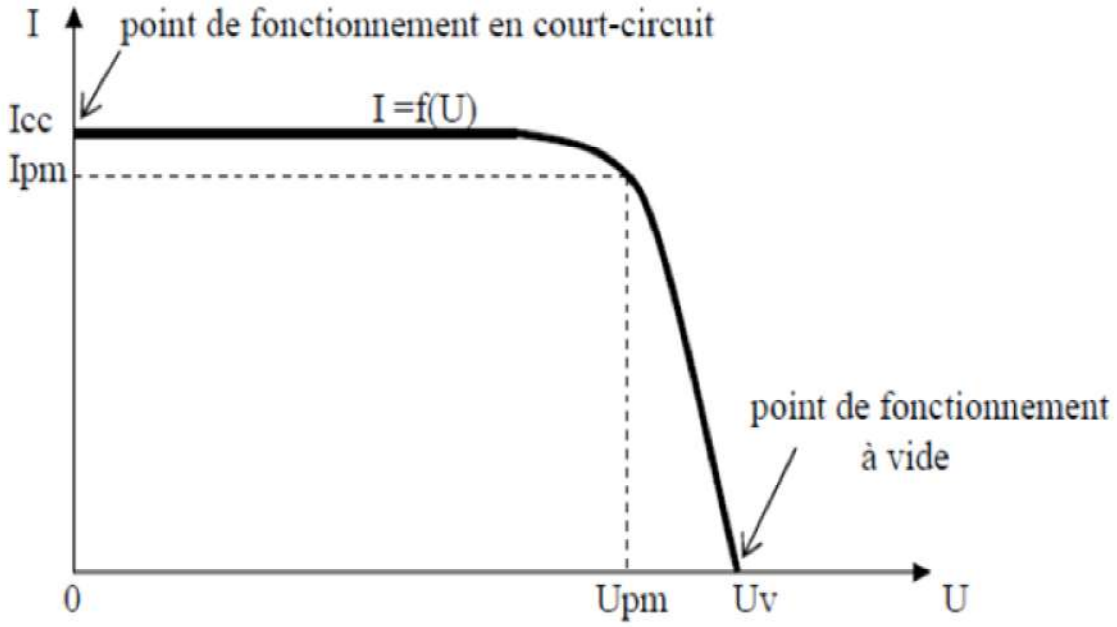


Figure I 8 : Caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Ainsi, la figure (I 9) illustre le schéma équivalent électrique d'une cellule PV réelle. Dans cette équation, on prend en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique. Ainsi, en statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante :

$$I_{CELL} = I_{CC} - I_s\left[\exp\left(\frac{V_{cell} + I_{CELL}R_s}{nV_T}\right) - 1\right] - \frac{V_c + I_{CELL}R_s}{R_p} \qquad (I.15)$$

Avec : $V_T = \frac{KT}{e}$

Où I_s est le courant de saturation

, V_T , le potentiel thermodynamique,

la constante de Boltzmann,

T, la température effective de la cellule en Kelvin,

e, la charge de l'électron,

n, le facteur de non idéalité de la jonction,

I_{CELL} : le courant fourni par la cellule,

V_{CELL} : tension à ses bornes,

I_{CC} : courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'éclairement et la température,

R_P : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

R_S : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

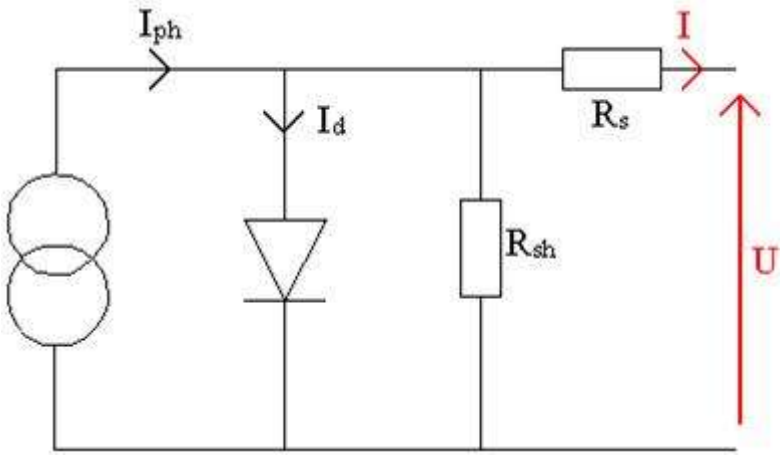


Figure I 9 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV

I.1.5.3 Générateur photovoltaïque :

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera.

Nous pouvons remarquer que comme pour une cellule, la caractéristique électrique I (V) d'un générateur photovoltaïque est non linéaire et présente un point de puissance maximale. Le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque est fonction de l'impédance de la charge qu'il alimente et dépend du niveau d'éclairement et de température (Voir figures (I.10) et (I.11). [29]

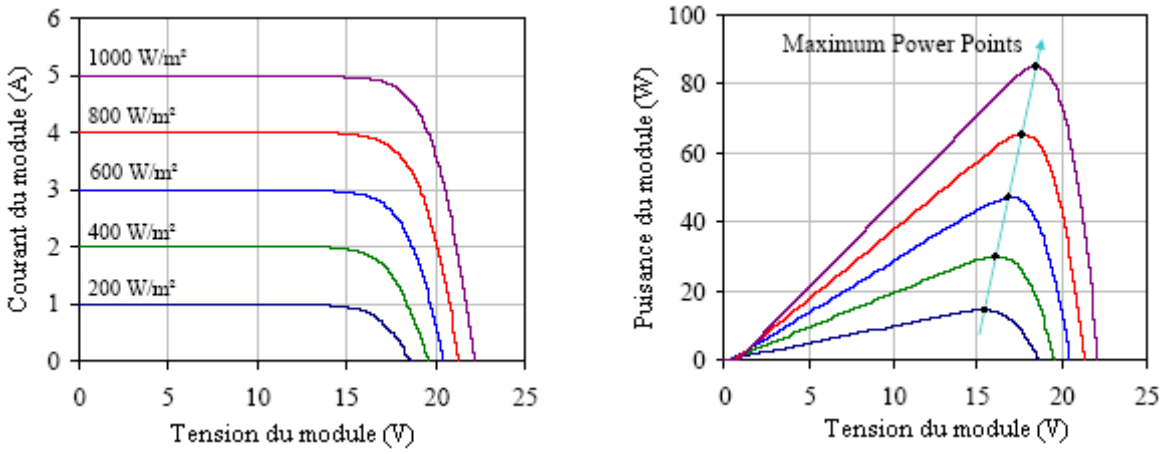


Figure I 10 : Influence du niveau d'éclairement

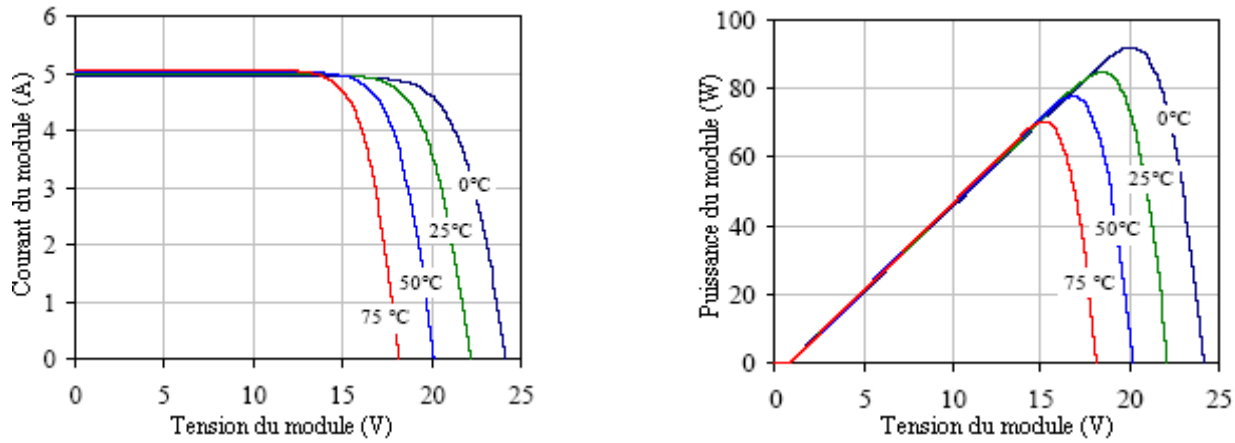


Figure I .11 : Influence de la température de la cellule (Rayonnement solaire de 1KW/m^2)

I.2 L'énergie éolienne

I.2.1 Notions théoriques sur l'éolien

La source d'énergie éolienne est le vent qui est essentiellement une manifestation de la chaleur déposée par le rayonnement solaire dans l'atmosphère. Elle crée des écarts de températures donc des masses d'air de densités différentes qui mettent en mouvement pour répondre aux variations de pression atmosphérique. Les spécialistes estiment à 2% l'énergie solaire incidente déposée sous forme d'énergie éolienne.

Les performances des machines dépendent de plusieurs caractéristiques du vent :

- ✓ sa distribution en vitesse : moyenne, facteur d'irrégularité, probabilité d'avoir une vitesse comprise dans l'intervalle ou la puissance est récupérable.
- ✓ sa distribution en direction, essentielle dans les parcs où il existe des effets de traînée.
- ✓ sa variation avec la hauteur.

Ces caractéristiques varient avec l'environnement de chaque site qu'il est donc essentiel d'étudier pour optimiser la conception, les emplacements et la puissance des éoliennes. Lorsque ces éoliennes sont équipées d'un générateur électrique, on les appelle des aérogénérateurs. Plusieurs de ceux-ci peuvent être regroupés sur un même site pour former un « parc d'aérogénérateurs » constituant une « centrale éolienne », appelée aussi une « ferme éolienne ». [3]

2.1.1 Les caractéristiques du vent et aérogénérateurs : aspects aérodynamiques

2.1.1.1 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 :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (1.16)$$

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 :

$$P = \frac{1}{2}\rho A v^3 \qquad (1.17)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air.

Cependant, le dispositif de conversion extrait une puissance Pe inférieure à la puissance incidente Pv, 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 :

$$C_p = \frac{P_e}{P} \; ; \qquad C_p < 1 \tag{1.18}$$

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

$$P_e = \frac{1}{2}\rho\pi.R^{.2}v.^3 C_p \tag{1.19}$$

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 la limite de Betz (théorie de Betz années 1920) du coefficient de puissance :

$$C_{p\,max} = \frac{16}{27} = 0{,}593 \tag{1.20}$$

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 :

$$Cp = Cp(\lambda)$$

$$\text{Avec :} \quad \lambda = \frac{R\Omega}{v}$$

Où $R\lambda$ est la vitesse linéaire périphérique en bout de pale de l'hélice.

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. [3]

On peut définir la notion de par le rapport :

$$\eta_a = \frac{C_p}{C_p^{\,max}} = \frac{C_p}{0{,}593} \tag{1.21}$$

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

La figure (I.12) montre l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des aérogénérateurs réels à axe horizontal à 1, 2, 3 et 4 pales, notons que sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0,59). Ces courbes dépendent pratiquement du profil des pales. Si on considère la machine tripale, on peut dire que son coefficient de puissance est maximal pour λ=7, c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse normalisée que l'on maximise le rendement aérodynamique. A diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation plus élevée qu'une tripale. [7]

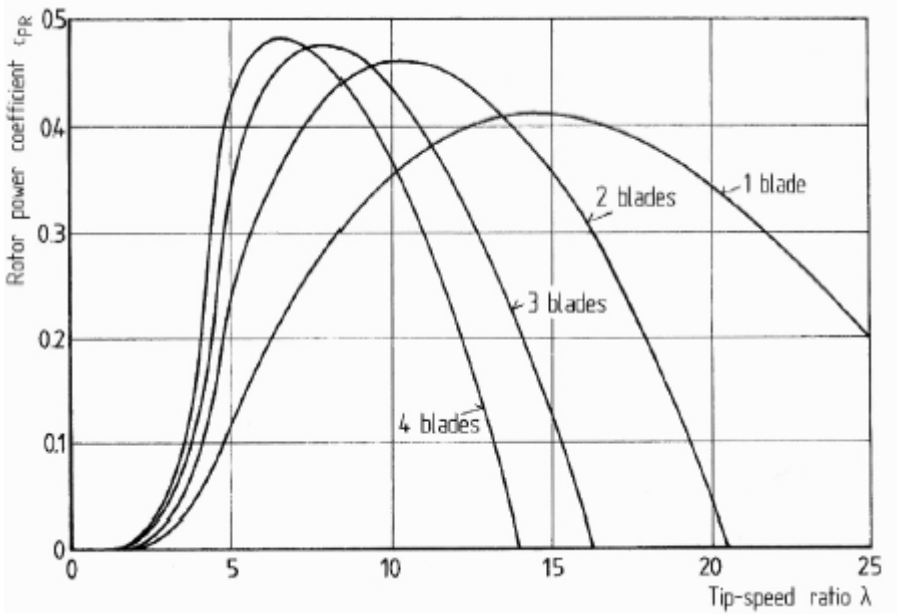


Figure I 12 : Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée λ.

Un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, permet de rester sur le maximum de la courbe.

Pratiquement la puissance récupérable ne dépasse pas 60 à 70% de la valeur de maximale (0,59) à cause des divers rendements successifs de la chaîne de conversion.

Si on fait le calcul avec une masse volumique de l'air égale à 1,2 kg/m3, on obtient, pour une vitesse moyenne de vent de 6 m/s, une puissance par unité de surface balayée de 77 W/m², soit une énergie annuelle de 670 kWh/m².

La productivité moyenne des aérogénérateurs danois valait environ 500 kWh/m² au début des années 80 et atteint 900 kWh/m² à la fin des années 90. [2]

I.2.1.1.2 Distributions de Weibull

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. Pour connaître les propriétés d'un site, des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps, sont nécessaires (un à dix ans).

En effectuant la caractérisation d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur de mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent augmente selon la hauteur. L'expression (I.22) donne la méthode de ce calcul et le Tableau (I.1) les valeurs de rugosité en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement proche. On précise que h est la hauteur du mat et h_{mes} la hauteur des appareils de mesure. [2]

$$V(h) = V\ (h_{mes}).\frac{Ln(h/\alpha)}{Ln(h_{mes}/\alpha)} \qquad (I.22)$$

α est le facteur de rugosité.

Tableau (I.1) Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement

Nature du sol	Paramètre de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0,0002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu	0,0024
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces	0,03
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m	0,055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m	0,1
Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m	0,2
Villages, petites villes, zones agricoles avec de nombreuses haies, Forets et terrains très accidentés	0,4
Grandes villes avec bâtiments hauts	0,8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel	1,6

La caractéristique la plus importante est la distribution statistique de Weibull (Figure (I.13)). Elle s'est révélée la plus adéquate pour l'emploi dans l'éolien. Elle modélise avec succès la probabilité de l'occurrence des vitesses de vent du gisement éolien. [4]

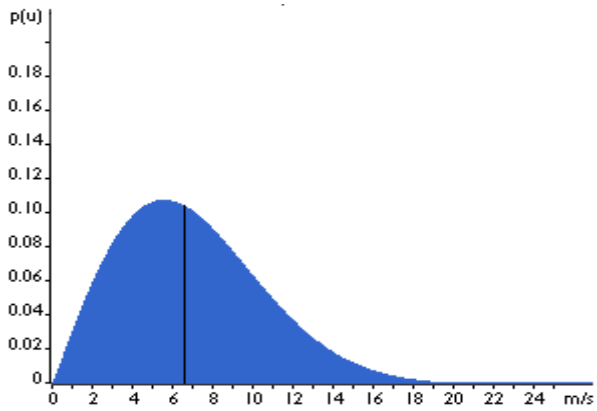


Figure I 13 : Exemple de la distribution de Weibull

Cette figure est obtenue grâce à l'expression (1.23) qui présente la fonction de distribution statistique de Weibull. Les paramètres k et c sont respectivement facteur de forme (sans dimension) et le facteur d'échelle en m/s. Habituellement, le facteur de forme qui caractérise la symétrie de la distribution est dans l'éolien égal à k=2. Le facteur d'échelle est très proche de la vitesse moyenne de la vitesse du vent V. [4]

$$P(V) = \frac{k}{c}.\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1}.e^{-(V/c)^k} \qquad \text{(I.23)}$$

I.2.1.1.3 Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur

Considéré comme une éolienne de conversion de l'énergie provenant des déplacements des masses d'air, l'aérogénérateur transforme cette dernière en énergie électrique.

Le couple transmis aux pales entraîne la rotation d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle est de multiplier la vitesse du rotor à une vitesse suffisamment grande pour que la génératrice puisse débiter une tension à sa sortie. [4]

I.2.1.1.4 Différents types d'aérogénérateurs

Il existe deux grandes catégories d'aérogénérateurs selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice.

- ✓ Les aérogénérateurs à axe horizontal ;
- ✓ Les aérogénérateurs à axe vertical.
- ✓ Type à voilure tournante.



Figure I 14 : à axe vertical



Figure I 15 : à axe horizontal



Figure I .16 : Technologie d'éoliennes de Type à voilure tournante

Généralement les aérogénérateurs sont choisis dans la catégorie à axe horizontal.

Le tableau (I.2) suivant propose une classification des aérogénérateurs selon leur puissance délivrée et le diamètre de leur hélice. [8]

Tableau (I.2) Classification des aérogénérateurs

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite Moyenne Grande	Moins de 12 m 12 m à 45 m 46 m et plus	Moins de 40 KW De 40 KW à 999 KW 1 MW et plus

I.2.1.1.5 Rapport d'énergie produite par rapport la taille :

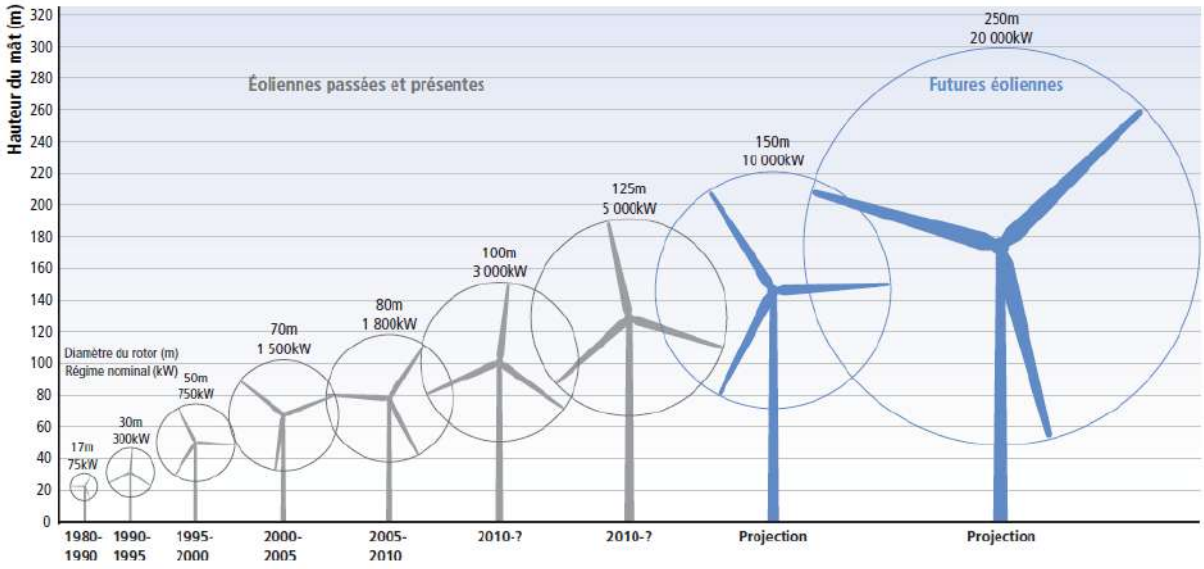


Figure I 17 : d'énergie produite par rapport la taille des palles

Pour augmenter la puissance des éoliennes, le diamètre des pales a progressivement augmenté au fur et à mesure que leur matériau s'allégeait (polyester métal, fibre de carbone)

vu que la puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par l'hélice. Des diamètres d'hélices de 30 à 80 m sont dorénavant fréquents pour une puissance unitaire de 1,5 à 3 (MW). [9]

I.2.1.1.6 Composition d'une éolienne à axe horizontal :

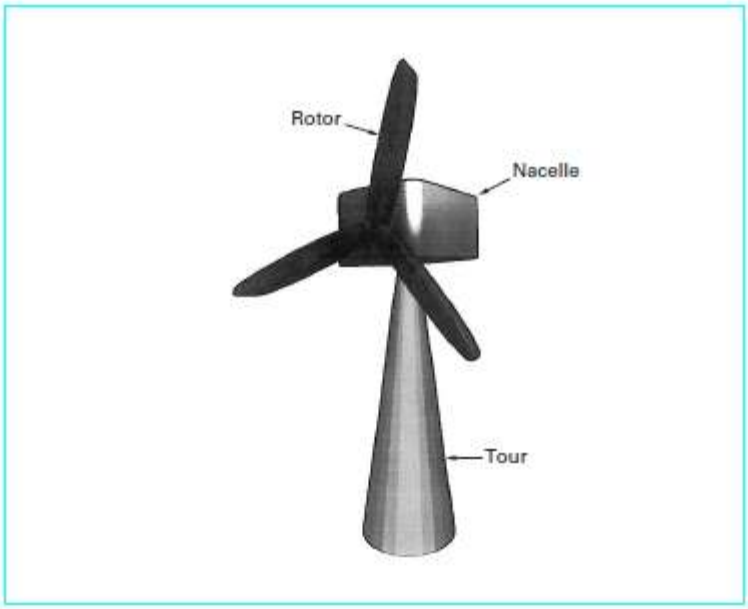


Figure I 18 : les composants d une éolienne a axe horizontal

I.2.1.1.6 .1 Rotor :

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variable, freinage du rotor... .

I.2.1.1.6 .2 Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine.

La figure(I.19) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

a- le multiplicateur de vitesse :

il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.

b-l'arbre secondaire :

Comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

c- la génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

d- un contrôleur électronique :

Chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor + nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts in stationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

e- divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

f- un groupe hydraulique et ses servitudes si nécessaire.

g- le dispositif d'orientation de la nacelle. Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical.

L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée :

Cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance.

Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours, de manière à éviter de tordre inconsidérément le câble acheminant l'énergie électrique provenant de la génératrice jusqu'au pied de la tour.

En effet, l'utilisation d'un collecteur tournant n'est guère envisageable au vu des intensités élevées qui transitent (parfois plusieurs centaines d'ampères).

Au bout d'un certain nombre de tours de la nacelle, celle-ci est alors manœuvrée en sens inverse à l'aide des moteurs d'orientation pour dévriller le câble. Celui-ci est généralement muni d'un interrupteur (actionné par la traction du câble résultant de son vrillage) qui empêche toute rotation supplémentaire de la nacelle en cas de défaillance du compteur. [9]

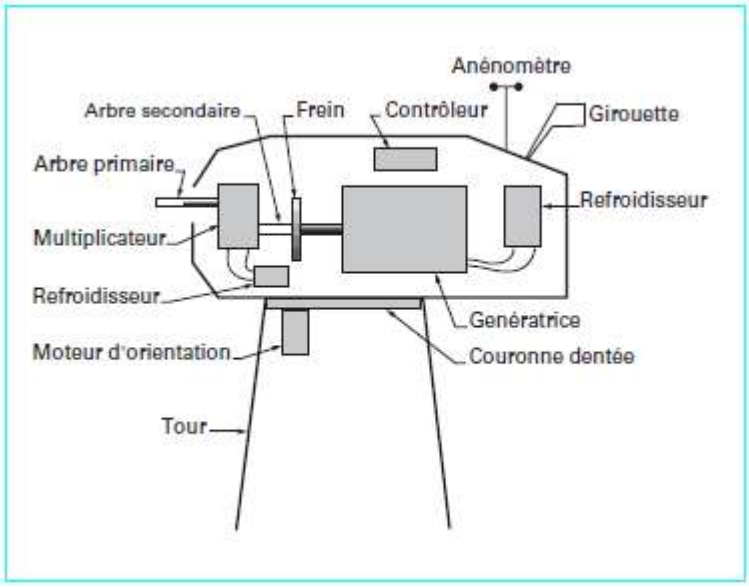


Figure I 19: Éléments d'une nacelle

I.2.1.1.6 .3 Tour :

a- tour tubulaire :

Bien que de construction plus complexe, elle a la faveur des constructeurs car elle permet d'abriter certains dispositifs de régulation ou de commande et apporte une protection évidente aux personnels chargés de la maintenance qui doivent grimper jusqu'à la nacelle (installation aisée d'une échelle voire d'un ascenseur intérieur). Son aspect esthétique est de plus un atout pour l'intégration visuelle harmonieuse de l'éolienne.

b-tour en treillis :

Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique déviant un handicap certain.

c- mât haubané :

il est simple de construction mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.

Il présente toutefois l'avantage de pouvoir soustraire l'éolienne à des conditions météorologiques extrêmes (forte tempête, cyclone).

L'emprise au sol du haubanage peut devenir un obstacle à son utilisation. [9]

2.1.1.7 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et délimiter la puissance.

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale P_n. La puissance P_n 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 coté 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_D, v_n et v_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

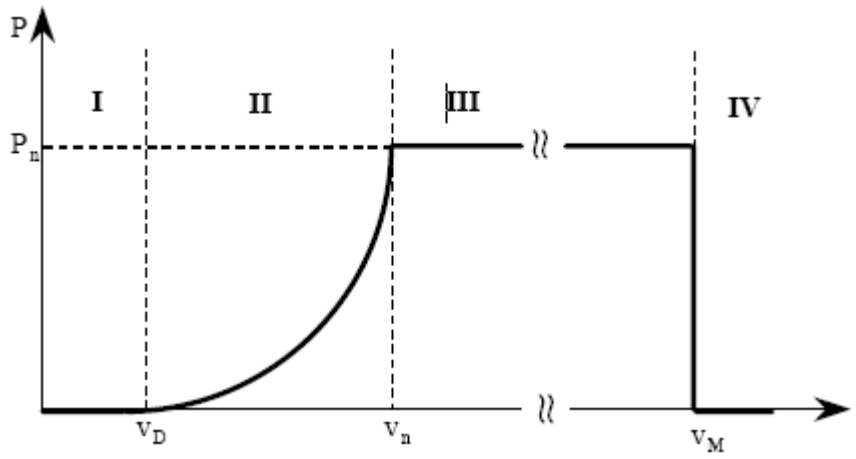


Figure I 20 : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

- ✓ la zone I, où P = 0 (l'aérogénérateur 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 égale à P_n,
- ✓ la zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

I.2.1.2 Les Avantages et les inconvénients de l'éolien :

a-Les Avantages :

-L' énergie éolienne est une énergie renouvelable.

-Pour les grands parcs d'éoliennes installait sur des terres agricoles, 2 % du sol est requis.

-L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement.

- Puissance modulable Période de haute productivité en hiver.

b-Les inconvénients :

- Stockage cher.
- Bruit. (Négligeable).
- Impact paysager.

-L'électricité éolienne est une énergie intermittent.

-L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

I.3 L'énergie Hydraulique

I.3.1 définition

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute, cours d'eau, courant marin, marée, vagues1. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

I.3.2 Hydroélectricité

I.3.2.1 définition

L'hydroélectricité ou énergie hydroélectrique exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

L'hydroélectricité constitue la première source renouvelable et la troisième source générale de production électrique au monde (16,3 % en 2011)(1) derrière le charbon (40,6%) et le gaz (22,2).[11]

I.3.2.1 Catégories de centrales

Une centrale hydroélectrique se compose d'une retenue d'eau (prise « au fil de l'eau » ou barrage) ainsi que d'une installation de production.

II.3.3 Les centrales gravitaires

Les centrales gravitaires mettent à profit l'écoulement de l'eau et un dénivelé. Elles peuvent être classées en fonction du débit turbiné et de leur hauteur de chute. Il existe trois types de centrales gravitaires (ici énumérées par ordre d'importance dans le mix hydraulique) :

a) les centrales au fil de l'eau

Utilisent le débit d'un fleuve et fournissent une énergie de base produite « au fil de l'eau » et injectée immédiatement sur le réseau. Elles nécessitent des aménagements simples et beaucoup moins coûteux que les centrales de plus forte puissance : petits ouvrages de dérivation, petits barrages servant à dériver le débit disponible de la rivière vers la centrale, éventuellement un petit réservoir lorsque le débit de la rivière est trop faible (constante de vidage inférieure à 2 heures). Elles sont généralement constituées d'une prise d'eau, d'un tunnel ou d'un canal, puis d'une conduite forcée et d'une usine hydroélectrique située sur la rive de la rivière. La faible perte de charge dans le tunnel ou le canal permet à l'eau de prendre de la hauteur par rapport à la rivière et donc d'acquérir de l'énergie potentielle

b) les centrales d'éclusée

Dans les grands fleuves à relativement forte pente, des barrages sur le fleuve ou sur un canal parallèle au fleuve provoquent des suites de chutes d'eau décamétriques qui ne perturbent pas la vallée dans son ensemble grâce à des digues parallèles au fleuve. Les usines hydroélectriques placées aux pieds des barrages turbinent l'eau du fleuve. Une gestion fine de l'eau stockée entre deux barrages permet de fournir de l'énergie de pointe en plus de l'énergie de base.

c) les centrales de hautes chutes

Sont également associées à une retenue d'eau créée par un barrage. Leur réservoir important (constante de vidage de plus de 200 heures) permet un stockage saisonnier de l'eau et une modulation de la production d'électricité : les centrales de lac sont appelées durant les heures de plus forte consommation et permettent de répondre aux pics. Elles sont nombreuses en France. L'usine peut être placée au pied du barrage ou bien plus bas. Dans ce cas, l'eau est transférée par des tunnels en charge du lac jusqu'à l'entrée de la centrale. [12]

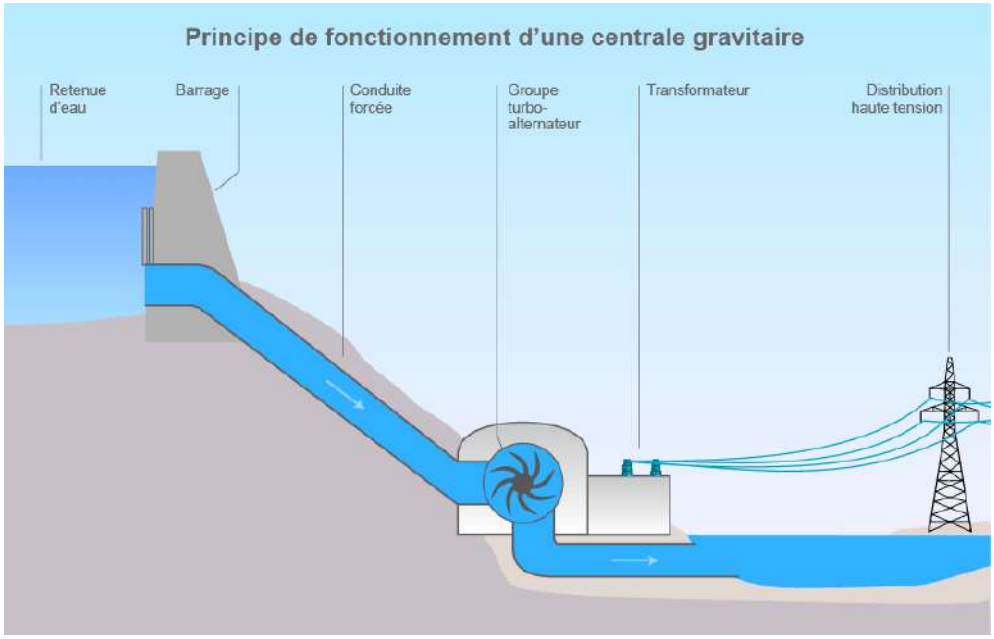


Figure I.21 : Principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire

I.3.3.2 Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Les stations de transfert d'énergie par pompage (ou STEP) possèdent deux bassins, un bassin supérieur (par exemple, un lac d'altitude) et un bassin inférieur (par exemple une retenue artificielle) entre lesquels est placé un dispositif réversible pouvant aussi bien fonctionner comme pompe ou turbine pour la partie hydraulique et comme moteur ou alternateur pour la partie électrique. L'eau du bassin supérieur est turbinée en période de forte demande pour produire de l'électricité. Puis, cette eau est pompée depuis le bassin inférieur vers le bassin supérieur dans les périodes où l'énergie est bon marché, et ainsi de suite. Les STEP ne sont pas considérées comme productrices d'énergie de source renouvelable puisqu'elles consomment de l'électricité pour remonter l'eau turbinée. Ce sont des installations de stockage d'énergie. Elles interviennent fréquemment pour des interventions de courte durée à la demande du réseau et en dernier recours (après les autres centrales hydrauliques) pour les interventions plus longues, notamment en raison du coût de l'eau à remonter. Le rendement entre l'énergie produite et l'énergie consommée est de l'ordre de 70% à 80%. L'opération se révèle rentable lorsque la différence de prix de l'électricité entre les périodes creuses (achet d'électricité à bas prix) et les périodes de pointe (vente d'électricité à prix élevé) est importante.

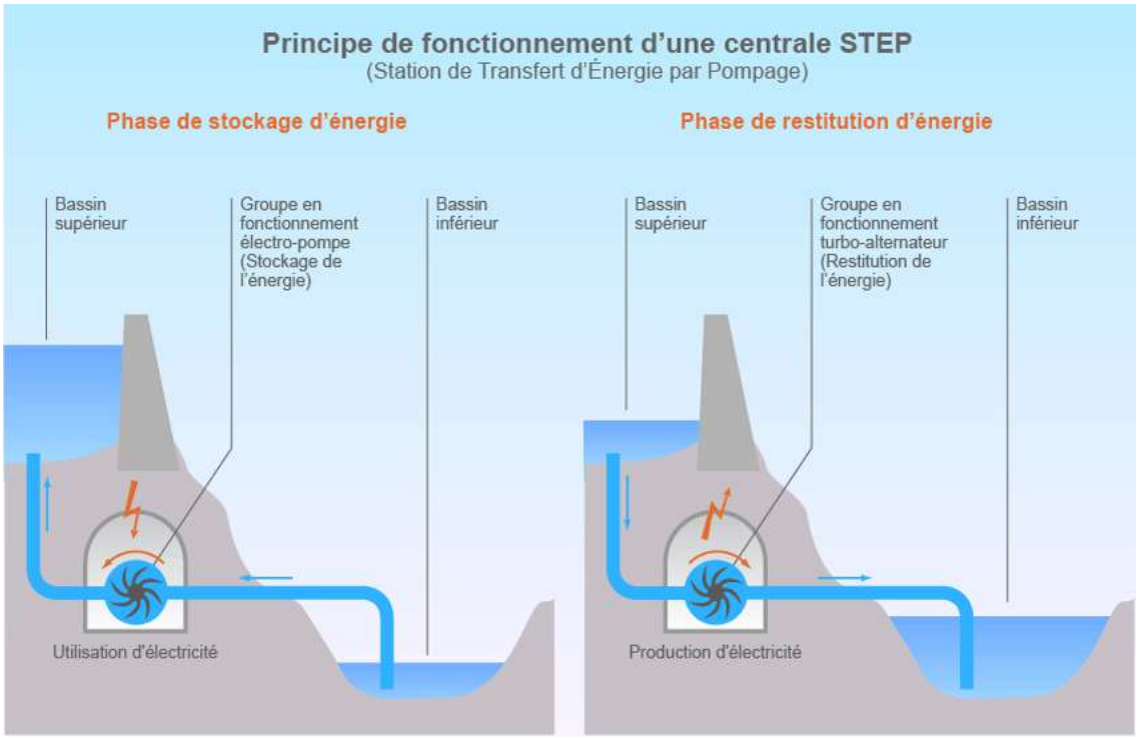


Figure I .22 : principe de fonctionnement d'une centrale STEP

I.3.4 Fonctionnement technique

Les centrales hydrauliques sont constituées de 2 principales unités :

a) une retenue ou une prise d'eau (dans le cas des centrales au fil de l'eau) qui permet de créer une chute d'eau, avec généralement un réservoir de stockage afin que la centrale continue de fonctionner, même en période de basses eaux. Un canal de dérivation creusé peut permettre de dériver latéralement l'excédent d'eau arrivant vers un étang de barrage. Un évacuateur de crues permet de faire passer les crues de la rivière sans danger pour les ouvrages.

b) la centrale, appelée aussi usine, qui permet d'utiliser la chute d'eau afin d'actionner les turbines puis d'entraîner un alternateur.

I.3.4.1 Les barrages

- Les plus fréquents, de loin, sont les barrages en remblai de terre ou d'enrochements obtenus en carrière par abattage à l'explosif. L'étanchéité est centrale (en argile ou en béton bitumineux) ou sur la surface amont (en béton de ciment ou en béton bitumineux). Ce type de barrage s'adapte à des géologies très variées.
- Les barrages poids construits d'abord en maçonnerie, puis en béton puis plus récemment en béton compacté au rouleau BCR) qui permet d'importantes économies de temps et d'argent. Le rocher de fondation doit être de bonne qualité.
- Les barrages voutes en béton adaptés aux vallées relativement étroites et dont les rives sont constituées de rocher de bonne qualité. La subtilité de leurs formes permet de diminuer la quantité de béton et de réaliser des barrages économiques.
- Les barrages à voutes multiples et à contreforts ne sont plus construits. Les barrages poids en BCR les remplacent. [9]

I.3.4.2 les turbines Les centrales sont équipées de turbines qui transforment l'énergie du flux d'eau en une rotation mécanique de façon à actionner des alternateurs.

Le type de turbine utilisé dépend de la hauteur de la chute d'eau *:*

- pour les très faibles hauteurs de chute (1 à 30 mètres), des turbines à bulbe peuvent être utilisées *;*
- pour les faibles chutes (5 à 50 mètres) et les débits importants, la turbine Kaplan est privilégiée : ses pales sont orientables ce qui permet d'ajuster la puissance de la turbine à la hauteur de chute en conservant un bon rendement
- la turbine Francis est utilisée pour les moyennes chutes (40 à 600 mètres) et moyen débit. L'eau entre par la périphérie des pales et est évacuée en leur centre
- la turbine Pelton est adaptée aux hautes chutes (200 à 1 800 mètres) et faible débit. Elle reçoit l'eau sous très haute pression par l'intermédiaire d'un injecteur (impact dynamique de l'eau sur l'auget).

Pour les petites centrales hydroélectriques, des turbines à prix bas (et dont le rendement est moins bon) et de concepts simples facilitent l'installation de petites unités.

I.3.5 Enjeux par rapport à l'énergie

I.3.5.1 Rentabilité et prévisibilité de la production

La construction de barrages est caractérisée par des investissements d'autant plus élevés que la hauteur de chute est importante et que la vallée est large. Ces dépenses d'investissements diffèrent fortement selon les caractéristiques de l'aménagement et les dépenses annexes liées aux contraintes sociales et environnementales, en particulier le coût des terrains expropriés. Les avantages économiques liés à la capacité de modulation de la production d'électricité permettent de rentabiliser ces investissements car la ressource hydraulique est gratuite et les frais d'entretien sont réduits.

L'énergie hydraulique permet de répondre aux besoins d'ajustement de la production électrique, notamment en stockant de l'eau dans de grands réservoirs au moyen de barrages ou de digues. Les fluctuations annuelles de la production hydraulique sont cependant importantes. Elles sont essentiellement liées aux précipitations. La production peut croître de 15% les années où la ressource hydraulique est forte et diminuer de 30% les années de grande sécheresse.

I.3.5.2 Impact social et environnemental

Il est parfois reproché à l'énergie hydraulique d'engendrer des déplacements de population, les rivières et les fleuves étant des lieux privilégiés pour installer des habitations. Par exemple, le barrage des Trois Gorges en Chine a entraîné le déplacement de près de deux millions de personnes. En raison d'une régulation modifiée de l'eau, les écosystèmes en amont et en aval des barrages peuvent être perturbés (notamment la migration des espèces aquatiques) bien que des dispositifs comme les passes à poissons soient installés.

I.3.6 Unités de mesure et chiffres clés

I.3.6.1 Mesure de la puissance hydroélectrique

La puissance d'une centrale hydraulique peut se calculer par la formule suivante :

$$P = Q.H.g.r$$

Avec :

- P : puissance en kW ;
- Q : débit moyen mesuré en mètres cube par seconde ;
- H : hauteur de chute en mètres ;
- g : constante de gravité, soit près de 9,8 (m/s2) ;
- r : rendement de la centrale (compris entre 0,6 et 0,9)

I.3.6.2 Chiffres clés

a) Dans le monde

- Chaque année, environ 3 500 TWh d'électricité sont produits dans le monde à partir de l'énergie hydraulique ;

- l'hydroélectricité représente 20% des capacités électriques installées avec un parc global de 1 040 GW (selon Enerdata, 2011) ;

- Une dizaine de pays, dont quatre en Europe, produisent plus de la moitié de leur électricité grâce à l'hydraulique. La Norvège vient en tête avec 98%, suivie par le Brésil avec 86%, la Colombie, l'Islande, le Venezuela, le Canada, l'Autriche, la Nouvelle Zélande et la Suisse. [10]

I.3.7.1 Passé et présent

Les barrages moulins existent probablement depuis la préhistoire mais c'est au Moyen-âge qu'ils se sont fortement développés en Europe pour alimenter les moulins à eau, moudre le blé, fouler le lin, préparer le cuir, alimenter les martinets et les forges, etc. À la fin du XIXe siècle, la turbine remplace la roue hydraulique et les premiers barrages destinés à la production d'électricité font leur apparition, ce qui permet d'éloigner les usines des rivières et de partager l'électricité produite par des unités de tailles croissantes

I.3.7.2 Futur

L'hydroélectricité fait l'objet d'investissements importants, en particulier en Asie et en Amérique latine, car il existe encore d'importantes ressources naturelles non exploitées. La production hydroélectrique mondiale a augmenté de 1 000 TWh en 1965 à plus de 3 500 TWh aujourd'hui.

Les centrales ont des impacts sur la biodiversité (mortalité de certaines espèces comme l'anguille.

I.4 Conclusion :

Dans ce chapitre on a donné une description et une présentation de plusieurs sources d'énergies renouvelables qu'ils sont pouvait remplacer les énergies fossiles avec moindre de pollution

Notre pays possède de très grands gisements solaires et éoliens donc la transition vers des énergies dites propres est possible

II.1 Introduction :

Le potentiel solaire de l'Algérie est classé parmi les plus élevés au monde. La durée d'ensoleillement annuel atteint 2000 heures à travers tout le territoire et 3900 heures au Sahara seul. L'énergie solaire reçue est de 1,7 KWh/m^2/année au Nord, 1,9 KWh/m^2/année aux hauts plateaux et 2,65 KWh/m^2/année au Sahara. Le vent et caractérisé par des vitesses modérées (2 à 6 m/s).

La population du Sud Algérien est concentrée dans des petits villages ou l'électricité est fournie par des réseaux isolés alimentés par des générateurs Diesel. Cette source d'énergie électrique possède un rendement énergétique faible et est souvent coûteuse à cause des coûts élevés de maintenance et de transport de carburant.

Cette étude concerne le dimensionnement et l'analyse économique des systèmes multi sources de production d'électricité d'origine renouvelable (PV, éolien, hydro, Diesel) ou un nombre de sources d'énergie renouvelable (soleil, vent, eau), de générateur diesel et de composant de stockage d'énergie sont combinés pour remplir la demande d'énergie d'une charge.

Ce système doit alimenter en énergie électrique un village situé à wilaya de bouira.

La conception des 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. 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 se fait en utilisant le logiciel Homer (hybrid optimisation model for electric renewable).

Avant de développer de tels systèmes pour un site spécifique il est important de savoir la demande en énergie et les ressources disponibles sur ce site.

II.2.Description D'un Système Hybride :

Le terme système hybride s'applique à tout système de production d'énergie utilisant des sources de natures différentes ; soient une source passive ou renouvelable (hydraulique, solaire ou éolienne) et une source active (Générateur thermique). Plus spécifiquement, les systèmes hybrides autonomes visés dans cette étude sont une combinaison des éléments suivants :

- un champ de panneaux PV
- une turbine éolienne

- une turbine hydroélectrique
- une ou plusieurs génératrices.
- un banc de batteries pour stocker l'énergie produite
- une unité de contrôle de charge de la batterie
- un onduleur pour adapter l'alimentation DC aux charges AC. II s'agit le plus souvent d'un onduleur bidirectionnel pouvant aussi assurer la fonction de redresseur lorsque la génératrice doit recharger les accumulateurs.
- et parfois une station de monitoring pour mesurer les paramètres (courant, tension, insolation, température).

II.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est basé sur un phénomène physique : l'effet photovoltaïque, éolien ou hydraulique sont captés puis transformés en électricité (courant continu ou alternatif) respectivement par le panneau photovoltaïque, l'aérogénérateur, la turbine hydroélectrique. Cette électricité est stockée dans les batteries par l'intermédiaire d'un régulateur assurant l'équilibre instantané entre production et consommation, elle peut ensuite être utilisée directement sous forme de courant continu ou sous forme de courant alternatif après transformation par un onduleur et un automate programmable gère les transitions entre les différents modes d'exploitation du système : diesel, et le mode hybride [9].

II.2.2. Les differentes configuration d'un système hybride :

Deux configuration s'imposent :

II.2.2.1 Architecture à bus à cc

ayant les avantages et les inconvinient suivants **:**

Les avantages :

-La connexion de toutes les sources sur un bus à cc simplifier le système de commande.

-Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale.

Les inconvénients :

-Le rendement de système sera faible parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et les pertes dans les convertisseurs.

-Les générateurs diesel ne peuvent pas alimentés la charges directement, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

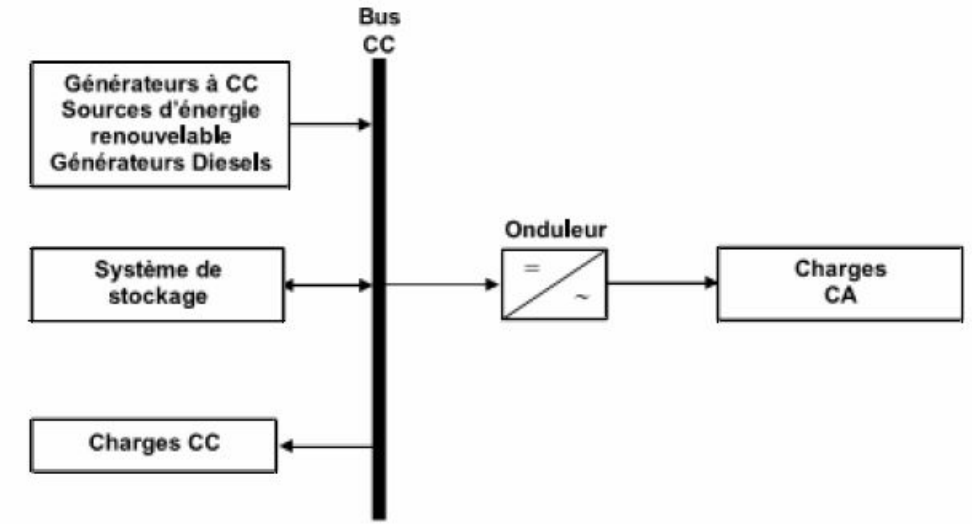


Figure II 1 : configuration à bus cc

II.2.2.2. Architecture à bus mixte à CC/AC :

- **Les Avantages :**

Le générateur diesel et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle dans les pics de charge.

La possibilité de réduire la puissance nominale de GD et de l'onduleur sans affecter la capacité de système à alimenter les pics de charge.

- **Les inconvénients** :

La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause de fonctionnement parallèle de l'onduleur qui doit être capable de fonctionner en mode autonome et non –autonome on synchronisant les tensions en entrée avec les tensions en sortie du GD.

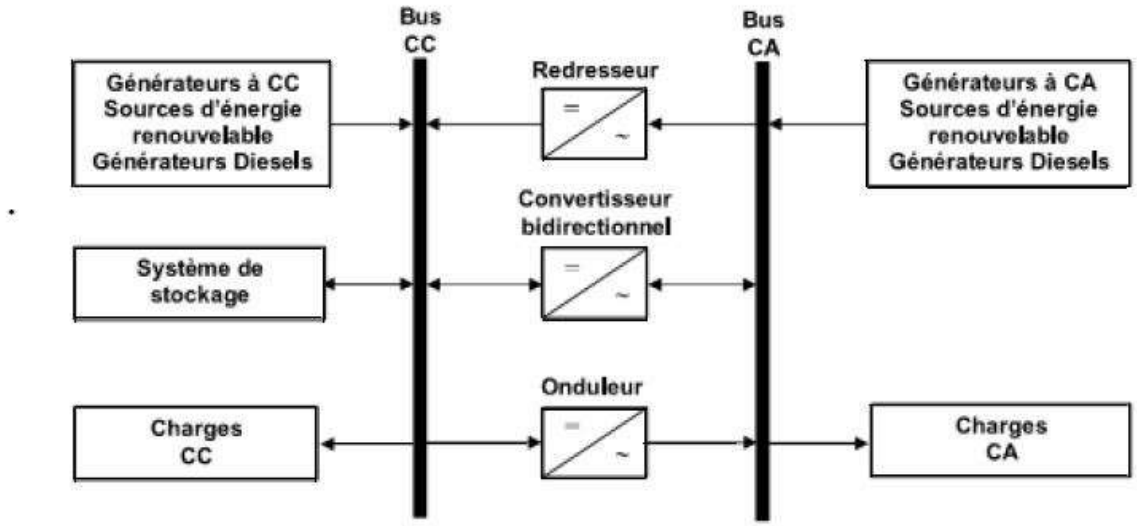


Figure II 2 : configuration à bus mixte

II.2.3. Système hybride PV/groupe diesel :

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 en 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 [16].

II.2.3.1. Catégories de systèmes hybrides PV/Diesel :

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

Dans ce système, 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 '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 [16].

II.2.3.1.1. Systèmes hybrides PV/Diesel série :

Dans ce système (voir figure (II.3)), 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 '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.

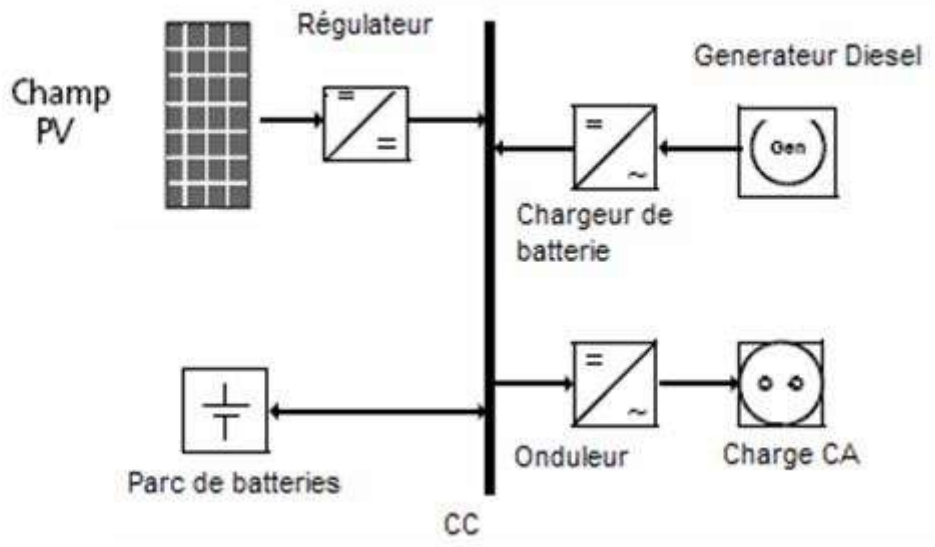


Figure II 3 : configuration d'une Systèmes hybrides PV/Diesel série

II.2.3.1.2. Système hybride PV/Diesel avec interrupteur :

Dans ce système (voir figure (II.4)), le parc de batteries peut être chargé par le générateur Diesel et le champ PV. 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 [16].

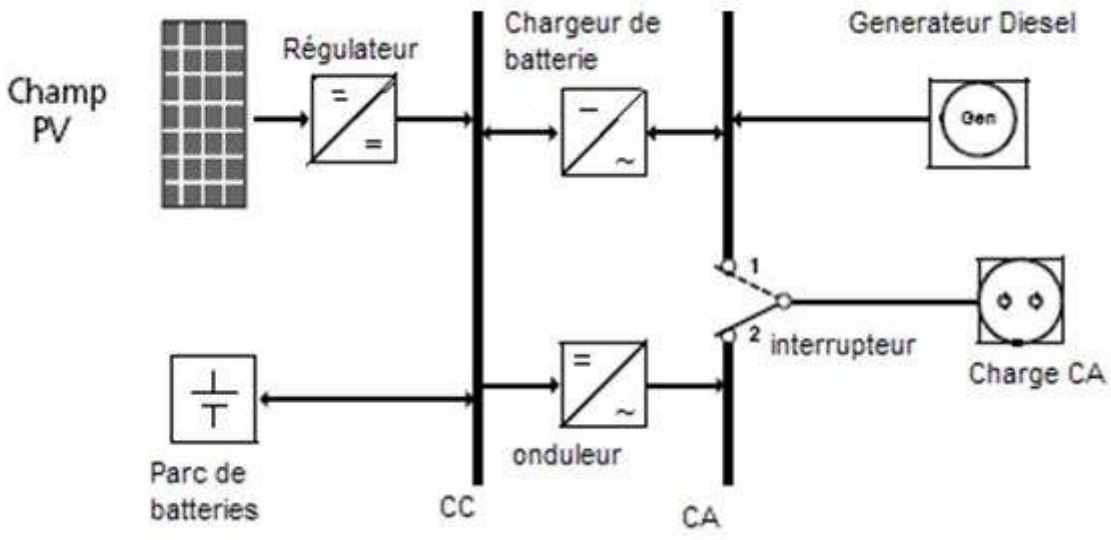


Figure II 4 : configuration d'une Système hybride PV/Diesel avec interrupteur

II.2.3.1.3. Système hybride PV/Diesel parallèle :

Le système hybride parallèle est illustré dans la figure (II.5) .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**.**

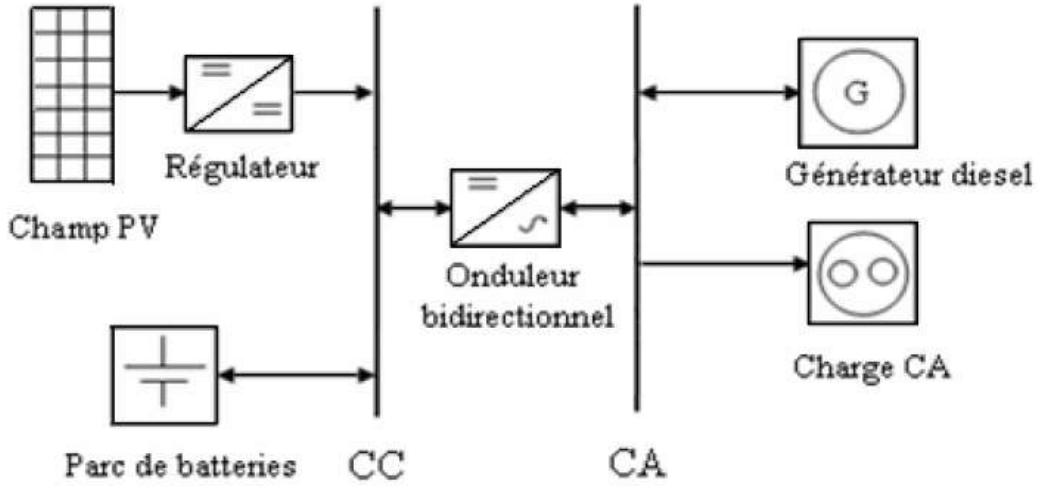


Figure 5 : configuration dune Système hybride PV/Diesel parallèle

II.2.4. Système hybride PV/ diesel /éolien :

Les systèmes hybride PV /diesel peuvent également être couplés avec d'autres sources d'énergie, telle les turbines éolienne et les microcentrales hydrauliques, lorsqu'il y a une complémentarité des productions électriques.

Dans les régions ensoleillées l'été avec des vents fort l'hiver, les systèmes PV/diesel/éolien permettent d'exploiter en plus l'énergie des vents pour couvrir une part de l'exigence de la charge qui, autrement serait couverte par un groupe diesel.[14]

La configuration d'un tel système est donnée par la figure 6 suivante :

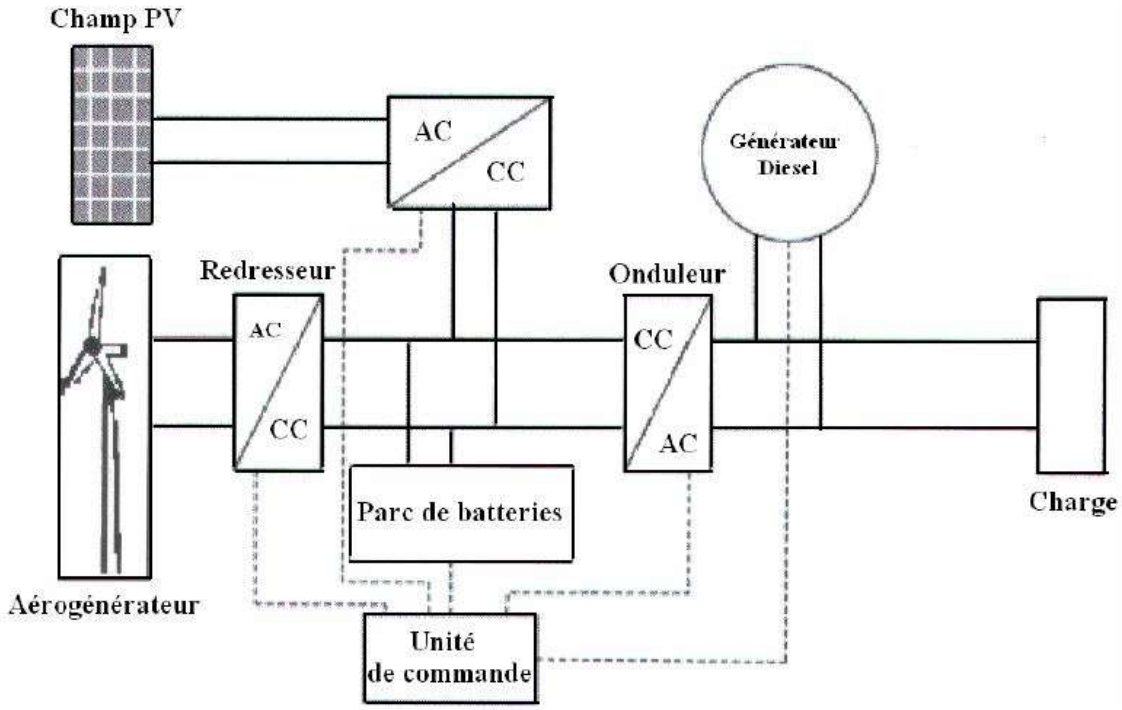


Figure II 5: configuration dune Système hybride PV/ diesel /éolien

II.2.4.1 Problème rencontrés dans un système hybride :

Les problèmes sont en générale causée par :

Les variations de l'énergie d'origine renouvelable (indépendamment à la charge).

Le manque de connaissances dans le domaine de la qualité de l'énergie en réseau faible.

Le moyen le plus simple d'éviter l'augmentation de risque de ne pas satisfaire complètement la charge est de faire fonctionner les sources d'énergies renouvelables et les génératrices diesel en parallèle [14].

II .3 Composants d'un système hybride :

II.3.1 Générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque, comme on l'a vu au chapitre 1, est un assemblage de cellules photovoltaïques. Dans ce qui suit on va présenter la modélisation de l'ensemble cellule/module/champ. Les étapes du calcul du courant sortant du module photovoltaïque, sous certaines conditions d'opération, sont présentées ci-dessous [15] :

$$P^{c}_{\max,o} = \frac{P^{M}_{\max,o}}{(N_{MS}.N_{MP})} \quad \text{(II.1)}$$

$$V^{c}_{oc,o} = \frac{V^{M}_{oc,o}}{N_{MS}} \quad \text{(II.2)}$$

$$I^{c}_{sc,o} = \frac{I^{M}_{sc,o}}{N_{PM}} \quad \text{(II.3)}$$

$$V^{c}_{t,o} = \frac{mkT_{0}^{c}}{e} \quad \text{(II.4)}$$

$$Voc,o = \frac{V^{c}_{oc,o}}{V^{c}_{t,o}} \quad \text{(II.5)}$$

$$f = \frac{(V_{oc,o} - Ln(V_{oc,o} + 0{,}72))}{(V_{oc,o} + 1)} \quad \text{(II.6)}$$

$$f_{0} = \frac{P^{c}_{\max,o}}{(V^{c}_{oc,o} I^{c}_{sc,o})} \quad \text{(II.7)}$$

$$r_{s} = 1 - \frac{f}{f_{0}} \quad \text{(II.8)}$$

$$R^{c}_{s} = \frac{r_{s} V^{c}_{oc,o}}{I^{c}_{sc,o}} \quad \text{(II.9)}$$

Où

$P^{c}_{max,o}$ **:** Puissance maximale de la cellule

$P^{M}_{max,o}$ **:** Puissance maximale du module

$V^{c}_{oc,o}$ **:** Tension du circuit ouvert de la cellule

$V^{M}_{oc,o}$ **:** Tension du circuit ouvert du module

$I^{c}_{sc,o}$: Courant de court-circuit de la cellule

$I^{M}_{sc,o}$: Courant de court-circuit du module

N_{MS} : Nombre de cellules en série

N_{MP} : Nombre de cellules en parallèle

$V^{c}_{t,o}$: Tension thermique du semi-conducteur d'une seule cellule

M : Facteur idéal

K : Constante de Boltzmann, k=1,381.10^{-21} J/K

T^{c}_{o} : Température de la cellule aux conditions standard =25°C

E : Charge de l'électron e=1,602.10^{-19} C

$V_{OC,0}$: Tension de circuit ouvert

F : Facteur de remplissage

f_0 : Facteur de remplissage aux conditions standard

r_s : Résistance série

R^{c}_{s} : Résistance équivalente de la cellule

Les paramètres de la cellule à la condition standard :

$$C_1 = \frac{I^{c}_{sc,o}}{G_{a,o}} \qquad \text{(II.10)}$$

$$I^{c}_{sc} = C_1.G_a \qquad \text{(II.11)}$$

$$T^{c} = T_a + C_2.G_a \qquad \text{(II.12)}$$

$$V^{c}_{oc} = V^{c}_{oc,o} + C_3\left(T^{c} - T^{c}_{o}\right) \qquad \text{(II.13)}$$

$$V^{c}_{t} = \frac{mk\left(273 + T^{c}\right)}{e} \qquad \text{(II.14)}$$

Où

C_2 : Constante, C_2=0,03Cm2/W

C_3 : Constante, généralement considérée C_3=-2,3mV/C°

$G_{a,o}$: Rayonnement, W/m^2

G_a : Rayonnement ambiant, W/m^2

T_a : Température ambiante, C°

T^{c}: Température de travail de la cellule

Le courant du module aux conditions d'opération est donné par:

$$I^M = N_{MP} I^c{}_{sc} \left[1 - \exp\left(\frac{V^M - N_{MS} V^c{}_{oc} + I^M R^c{}_s \frac{N_{MS}}{N_{MP}}}{N_{MS} V^c{}_t} \right) \right] \qquad \text{(II.15)}$$

Où

I^M **:** Courant total généré par le module

V^M **:** Tension appliquée aux bornes de la cellule

Le courant du champ aux conditions d'opération est donné par

$$I^A = \sum_{i=1}^{M_P} I_i \qquad \text{(II.16)}$$

Où

$$I^A = M_P . I^M \qquad \text{(II.17)}$$

I^A **:** Courant total du champ

M_P **:** Nombre de modules en parallèle

La puissance générée par le champ PV est :

$$P^A = I^A . V^A \qquad \text{(II.18)}$$

Où

P^A **:** Puissance générée par le champ PV

I^A **:** Courant total généré par le champ PV

V^A **:** Tension appliquée au champ PV

- **Orientation optimale**

Le plan du capteur doit être parallèle à l'équateur (plein Sud dans l'hémisphère Nord, et plein Nord dans l'hémisphère Sud). Une adaptation sera éventuellement nécessaire en fonction du terrain (présence de masques), il faudra alors choisir l'orientation qui permet le maximum d'ensoleillement journalier et il sera nécessaire d'adapter la taille du générateur.[15]

- **Inclinaison (par rapport à l'horizontale)**

Elle va être fixée par :

- **La latitude du site:**

Tableau (II.1) Inclinaison optimale en fonction de la latitude

Pour une utilisation à l'année	
.Latitude φ	.Inclinaison α
.φ <10°	.α =10°
.10°< φ<30°	.α = φ
.30°< φ<40°	.α = φ+10°
.φ >40°	.α = φ+15°

- **la périodicité d'utilisation (permanente, été seulement...)**

Elle est choisie pour que l'angle d'incidence des rayons solaires soit le plus proche de la perpendiculaire au plan du capteur le plus longtemps possible. Cette inclinaison sera sensiblement égale à la latitude ou légèrement supérieure pour les sites les plus élMoignés de l'équateur [6].

II.3.2 Onduleur :

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance, il convertit la tension continue en tension alternative contrôlée de façon très précise. Les onduleurs peuvent être à transistor de puissance ou à thyristors.

Les onduleurs peuvent être classés en générateurs produisant soit une onde sinusoïdale, soit une onde carrée ou encore dite pseudo-sinusoidale. Le choix de l'onduleur va dépendre des appareils qu'il devra faire fonctionner. Les onduleurs modernes utilisent des techniques à base de microprocesseurs pour générer une tension sinusoïdale à l'aide d'impulsions variables en largeur (PWM). Ces impulsions commandent des transistors MOS de puissance à faibles pertes alimentant un transformateur. A la sortie du transformateur, un filtre éventuel coupe les harmoniques provenant de la commande digitale. Cette technique est largement répandue et les coûts de tels appareils ont tendance à baisser [14]

L'onduleur est caractérisé par son rendement de puissance (η_{ond}).

L'énergie à la sortie de l'onduleur est :

$$E_{ond}=E_{PV}.\ \eta_{ond} \qquad \text{(II.19)}$$

Où

E_{ond} **:** Energie à la sortie de l'onduleur**,** en KWh

E_{PV} **:** Energie généré par le champ PV, en KWh

η_{ond} : Rendement de l'onduleur

II.3.3 Régulateur de charge :

L'énergie solaire est de nature intermittente et les besoins en électricité ne correspondent pas souvent aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière. On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu. Ainsi, quand l'énergie produite est supérieure à l'énergie consommée, l'excédent d'électricité est stocké dans les batteries jusqu'à ce que la limite de charge des batteries soit atteinte. Inversement, quand l'énergie produite est inférieure à l'énergie consommée, les batteries fournissent la quantité d'énergie manquante jusqu'à ce que la limite de décharge des batteries soit atteinte. Un régulateur est alors indispensable pour protéger la batterie contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie. L'objectif d'un régulateur de charge est donc de protéger la batterie pour assurer une meilleure durée de vie. En effet, c'est presque toujours la batterie qui dure le moins longtemps dans une application solaire si l'on n'y prend pas garde. Améliorer la durée de vie d'une batterie, c'est empêcher :

La surcharge : éviter que la tension dépasse un certain seuil.

La décharge profonde : éviter que la batterie soit vidée de lus de 60 à 70 % de sa charge.

On réalise ces deux fonctions avec un régulateur de charge-décharge connecté avec les panneaux, la batterie et la charge électrique.

Les principaux régulateurs sont :

- Régulateur de charge Shunt :
- Régulateur de charge Série :
- Régulateur à sectionnement :

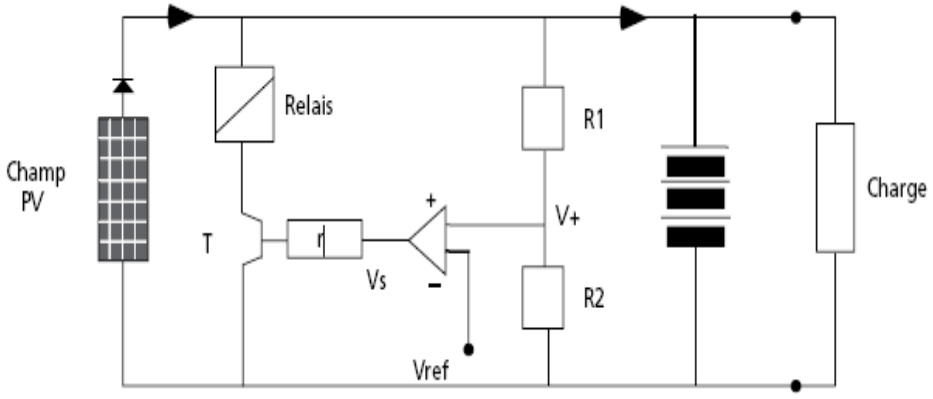


Figure (II.7) Schéma du régulateur shunt

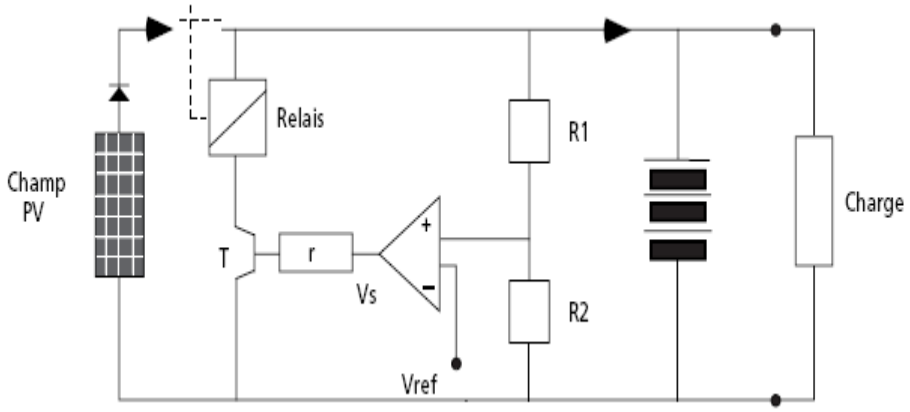


Figure (II.8) Schéma du régulateur série

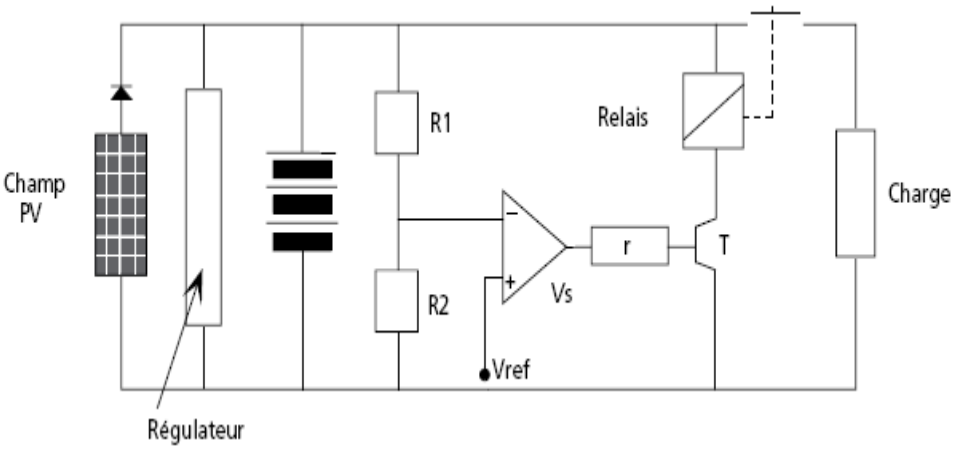


Figure (II.9) Schéma du régulateur à sectionnement basse tension automatique

II.3.4 Batterie :

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de modules PV. Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire. En effet :

• La demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, les appareils utilisés fonctionnent soit en continu, soit à la demande ;

• L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, été/hiver) et aléatoire (conditions météorologiques). Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'électricité. Le système tampon utilisé le plus couramment pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques.

A cause de la nature variable des radiations solaires, les accumulateurs doivent pouvoir résister sans dommage à de nombreux cycles de charge et de décharge. La profondeur de décharge auquel un accumulateur peut être soumis dépend de son type. Ainsi, les accumulateurs plomb-calcium sont utilisés pour des applications où la décharge est inférieure à 20 % par cycle (décharge faible). Les accumulateurs nickel-cadmium et quelques types d'accumulateurs plomb-antimoine, peuvent être utilisés pour des applications ou la décharge pourrait excéder 80 % (décharge profonde) [14].

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

• **II.3.4.1 Autonomie** : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux. Selon les conditions du site et la présence d'une génératrice d'appoint, les batteries d'accumulateurs sont dimensionnées pour permettre une période d'autonomie du système de quelques jours à quelques semaines.

- **Courant de surcharge :** Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- **Stabilisation de la tension** : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée. Les deux types de batteries utilisés le plus couramment dans les systèmes photovoltaïques sont les batteries avec accumulateurs au plomb-acide (Pbacide) et les batteries avec accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd).

Chacune a ses propres particularités et, selon les méthodes de construction, elles auront des caractéristiques de fonctionnement très différentes. La batterie au plomb-acide est la plus connue, étant utilisée depuis plus de 150 ans pour fournir le courant de démarrage des voitures, l'électricité des systèmes d'urgence et la force de traction des véhicules électriques.

La batterie au nickel-cadmium a été conçue pour répondre à un besoin prolongé de stockage d'énergie dans des conditions de fonctionnement extrême et de maintenance minimale. Il existe également quelques types de batteries au nickel-cadmium. Néanmoins, une des différences les plus importantes entre les batteries au plomb-acide et celles au nickel-cadmium se trouve au niveau de leur tension de fonctionnement. Alors qu'une cellule au plomb-acide fournit une tension nominale de 2,0 volts, la cellule au nickel-cadmium fournit une tension nominale de 1,2 volt.

Dimensionner la batterie, c'est choisir un stockage tampon permettant de s'affranchir de variations climatiques temporaires, à l'échelle de l'heure, de la journée et de quelques jours d'autonomie.

La capacité de la batterie exigée pour supporter l'énergie de la charge à alimenter est calculée par l'expression suivante :

$$C_{bat} = \frac{E_{bat}}{\eta_{dech}\left[N_{cel}.V_{dech}\right]P_D.N_{bat}} \qquad \text{(II.20)}$$

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

η_{dech} : rendement de décharge

N_{cel} nombre de cellules en série dans une batterie

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

P_D : profondeur de décharge

N_{bat} : Nombre de batteries en parallèle

II.3.5 Générateur Diesel :

La capacité est exprimée en kW et sa valeur de courant limite ne doit pas dépasser le taux de charge de la batterie. Sa consommation de carburant et la nécessité d'une maintenance cyclique au bout d'un certain nombre d'heures d'opération, en font un élément polluant au coût de production élevé. Pour minimiser les coûts de production il faut donc limiter le nombre de démarrages et d'heures de fonctionnement du groupe. Son rendement médiocre à faible charge constitue un inconvénient majeur**,** d'ou la nécessité d'opérer le plus possible à plein régime [14].

II.3.6 la Turbine éolienne :

Il s'agit d'un ensemble de dispositifs qui transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, laquelle est ensuite le plus souvent transformée en énergie électrique [4].

.

II.3.7 La turbine hydraulique :

C'est une machine tournante qui produit une énergie mécanique a partir d'eau en mouvement (cours d'eau ou marée) ou potentiellement en mouvement (barrage)

Elle est destinée pour la production de l'énergie électrique à partir d'un flux d'eau

L'énergie produite par la turbine hydraulique dépend à la variation des saisons et la hauteur de chute et le débit de l'eau (m /s) [13].

II.4 L'algorithme de conception d'un système Hybride :

1. Définir les ressources climatiques du site : ensoleillement, vent et température, débit d'eau

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, turbine hydraulique.

II.5 La 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 la charge la plus élevée pour les groupes électrogènes. Un système hybride doit intégrer la nécessité de réduire les coûts de fonctionnement, d'où une planification adéquate pour une utilisation optimale des diverse sources d'énergie disponibles. Pour les PV et les éoliennes, la source d'énergie étant gratuite, les coûts de fonctionnement infimes sont contrecarrés par un investissement initial élevé pour couvrir l'acquisition et l'installation des équipements. Un système hybride doit donc permettre d'utiliser au maximum les ressources solaires et éoliennes tout en minimisant les coûts d'approvisionnement en carburant pour la génératrice diesel [1].

II.6 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 du besoin. La méthode d'analyse suggérée dans le cadre de ce projet et utilisée par les trois logiciels 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 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.-à-d. les coûts initiaux du projet) vis-à-vis des technologies conventionnelles concurrentes. Ceci a conduit certaines personnes à la conclusion que les technologies d'énergies renouvelables sont trop dispendieuses. Malheureusement, ce point de vue ignore les coûts très réels induits par l'exploitation et l'entretien de tous systèmes d'énergies, 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. En effet, les mesures d'efficacité énergétiques réduisent les besoins énergétiques, et les technologies d'énergies renouvelables utilisent des sources d'énergies renouvelables disponibles à un coût marginal minimal ou nul.

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 majeures et les remplacements d'équipements ;
- Les coûts pour le démantèlement du projet (qui peuvent être relativement élevés pour les technologies qui polluent un site, par exemple à cause des déversements de combustible) ; 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 lorsque 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 décharge, 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.

II.6.1 Coût d'un système multi sources :

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, hydraulique, diesel ….)
- Les coûts de remplacements des différents sous-systèmes.
- Les profits réalisés.

II.6.2 L'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.

II.6.3 Coût actualisé net total :

Le coût actualisé net total est calculé à partir de l'équation suivante [1]

$$CAN = \frac{C_{ann,tot}}{F_a(i,N)} \qquad (II.21)$$

Où :

$C_{ann,\,tot}$: Coût annuel total.

F_a : Facteur d'actualisation

i : Taux d'intérêt.

N : Durée de vie du système.

$$F_a(i,N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \qquad (II.22)$$

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

Le coût annuel total est la somme de :

- Coût annuel du capital d'investissement
- Coût annuel de remplacement des composants du système.
- Coût annuel de maintenance de chaque composant du système.
- Coût annuel du carburant.

II.6.4 Le 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 [1].

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

- La durée de vie.
- Le coût d'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 :

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

Tableau (II.2) Coûts de référence des composants

Composants	PV	Batterie	Génératrice Diesel	Onduleur	Aérogénérateur 275 KW	Hydro 110 ,36 KW
Coût d'investissement	60000 DA/KW	300000 DA	30840 DA	16800 DA	6988200 DA	1200000 DA
Durée de vie (ans)	25	5	1.7	10	20	50
Coût d'opération et de maintenance	1200 DA/AN	12 DA/AN	18 DA/AN	1200 DA/AN	1300 DA/AN	120000 DA/AN
Coût de remplacement	60000 DA/KW	240000 DA	30840 DA	15120 DA	6988200 DA	60000 DA

Conclusion :

Dans ce chapitre on a donné une présentation pour les systèmes hybrides et leurs composants et leurs configurations et ses différentes architectures

Le soleil et le vent sont des sources d'énergies renouvelables, qui ne délivrent pas une puissance constante.

Ces dernières années, l'utilisation des énergies renouvelables comme le photovoltaïque et l'éolien est en forte croissance pour la production de l'électricité. Mais ces systèmes doivent être hybridés avec d'autres sources d'énergie comme le groupe diesel, les besoins de production d'énergie électrique est de plus en plus nécessaires.

Dans ce chapitre, le but de ce travail est de présenter une contribution basée sur la modélisation d'un système hybride «énergies renouvelables-groupe diesel», et qui va améliorer la fiabilité du système.

Résultats et discussions

Dans ce chapitre le logiciel Homer et les résultats de dimensionnement et de simulation sont présentés et commentés.

III.1 Présentation de Homer

Homer est un logiciel pour la simulation et l'optimisation de génération électrique distribuée développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL). Le modèle doit être renseigné des ressources disponibles, des options technologiques, des coûts et des charges à respecter par le système. Les composants qui peuvent être modélisés sont des modules PV, des éoliennes, des générateurs, des batteries, des convertisseurs AC/DC, des électrolyseurs, des réformateurs, des réservoirs d'hydrogène.

Les charges peuvent être saisies en tant que profil de charge quotidien ou importées d'un fichier de données horaires. En tout état de cause, les valeurs horaires des charges doivent être définies pour chacune des 8760 heures d'une année. En ce qui concerne les composants, des fonctions de coûts linéaires sont adoptées et les dimensions des composants à prendre en considération doivent être préalablement prévues afin de réaliser l'optimisation. Le nombre de type multiplié par le nombre de composants donne le nombre de configurations de systèmes simulés par le programme. HOMER est un modèle de séries chronologiques et effectue un bilan énergétique horaire le long d'une année pour chaque configuration de système rentrée par l'utilisateur. Il affiche ensuite la liste des configurations de systèmes triés par le coût actuel net (qui combine le coût en capital - annualisé par l'amortissement du composant au cours de sa durée de vie en utilisant les taux d'actualisation réelle - et celui de remplacement, fonctionnement et entretien).

Des analyses de sensibilité peuvent également être effectuées pour certaines variables (par exemple la vitesse annuelle du vent, l'irradiation annuelle). Enfin, une analyse de contrainte peut également être effectuée au moyen d'un facteur de capacité annuelle limitée à une valeur maximale : si ce paramètre est fixé à 0%, alors le système doit satisfaire les charges tout le temps, alors que s'il est fixé à des valeurs de 1% à 5% des économies considérables en puissance de crête et des différences entre les scénarios optimisés sont obtenues. HOMER est largement utilisé et accepté comme un outil de simulation distribué, tant au niveau national que international.

III.2 Principales caractéristiques

Ce logiciel permet de faire des simulations pour ensuite optimiser les systèmes et pour finalement terminer avec des analyses de sensibilité sur ces systèmes optimisés. La solution obtenue par HOMER est la solution la moins coûteuse parmi différentes combinaisons de

systèmes d'énergies renouvelables, d'énergies fossiles ou de systèmes hybrides comprenant deux sources d'énergie ou plus. Le logiciel permet de faire la simulation d'un système selon des données de gisement (solaire, éolien, diesel, etc.) en fonction d'une demande énergétique (besoins en énergie). Par la suite, il est possible d'analyser plusieurs configurations différentes pour ce même système afin d'en obtenir un système optimisé au niveau du coût. Le logiciel simule toutes les configurations demandées et donne la meilleure solution, la solution la moins chère, parmi celles-ci. Ensuite, il est finalement possible de faire des analyses de sensibilité afin de savoir si la solution trouvée reste la meilleure même s'il y a certains changements dans les différents paramètres entrés (variation du coût de la technologie, variation dans les données de gisement, etc.). Il est donc possible de faire bon nombre d'analyses avec de nombreuses configurations différentes en moins de quelques minutes de simulation.

Le logiciel permet de faire des simulations avec différents systèmes de production d'énergie :

- panneaux solaires photovoltaïque,
- éoliennes,
- barrage hydroélectrique au fil de l'eau,
- biomasse, génératrices (diesel, essence, biogaz, combustibles alternatifs et combustibles personnalisés, Co-alimentée),
- réseau électrique,
- micro turbines,
- piles à combustible.

Homer offre aussi une vaste gamme de dispositifs d'accumulation ou de récupération d'énergie :

- banque de batteries,
- volants d'inertie (flywheels),
- flow batteries,
- Hydrogen.

On peut aussi entrer divers types de besoins énergétiques :

- profils de consommation journaliers avec des variations selon les saisons,
- charge différée pour le pompage d'eau ou pour la réfrigération,
- charge thermique,
- mesures d'efficacité énergétique.

Homer peut donc simuler un large éventail de systèmes différents en plus de toutes les combinaisons possibles de systèmes hybrides.

III.3 Architecture de simulation

On peut schématiser l'architecture de simulation de Homer dans la figure (III.1)

Le bloc des entrées englobe les données de la charge, des ressources météorologiques locales du site et les composants qui constituent le système.

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

Les résultats économiques mettent en évidence le coût sur la dure de vie du système et le coût d'énergie.

Homer est utilisé pour déterminer les dimensions de chaque composant du système hybride. Les données d'entrée du programme sont :

- ✓ Les coordonnées géographiques du site.
- ✓ Les données horaires de la charge pendant toute l'année.
- ✓ Les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire sur un plan horizontal

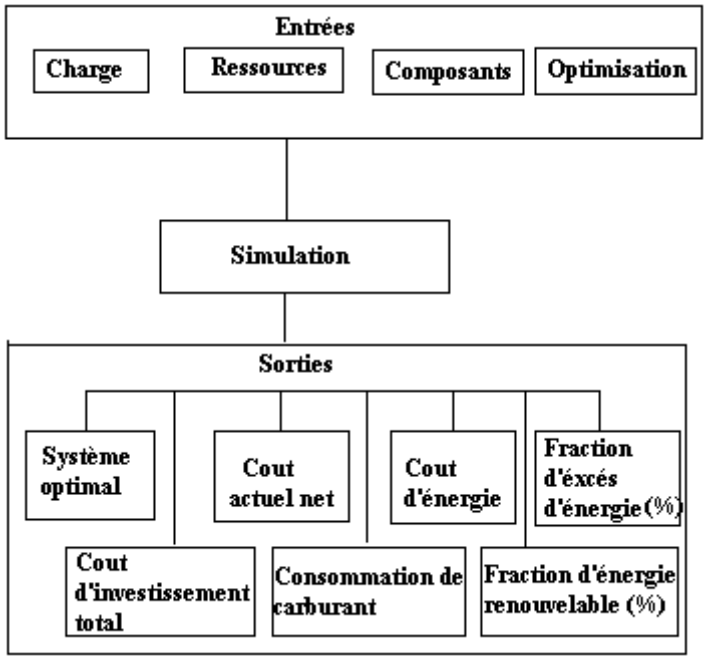


Figure III.1 : schéma de l'architecture de simulation de Homer

et de la vitesse du vent journalières ainsi que les caractéristiques géographiques de chaque site.

- ✓ Les capacités et le nombre de chaque composant du système hybride (Champ PV, Aérogénérateur, Générateur Diesel, Onduleur, Batterie).
- ✓ Les coûts de référence de chaque composant du système hybride.

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 des composants du système qui sont capables de satisfaire la demande. Les solutions faisables sont classées selon le coût 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

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

Ou d est le facteur (derating factor) ; pris égale 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 un type d'aérogénérateurs (MP-R) dont la courbe de puissance est illustrée dans la figure (III.2)

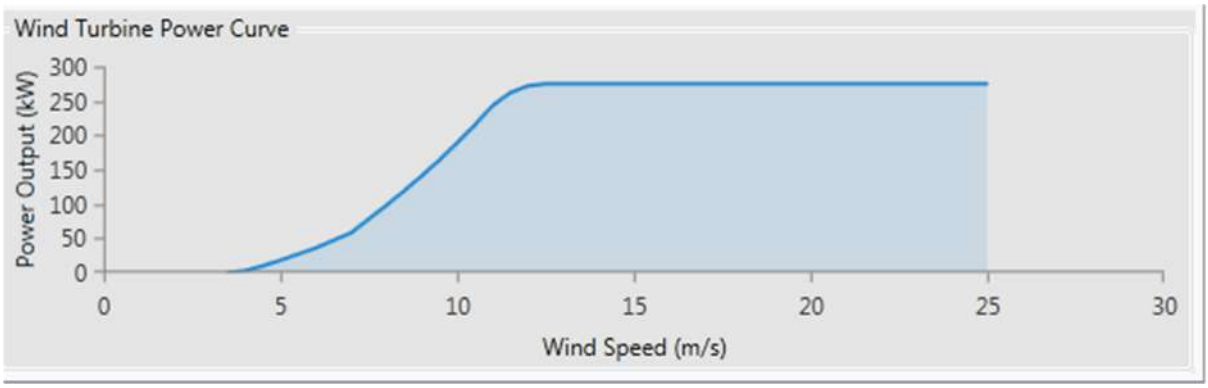


Figure III.2 : la courbe de la puissance produite par la turbine en fonction de vitesse du vent

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'autocorrélation qui est une mesure du caractère aléatoire du vent. Des valeurs élevées de ce facteur indiquent que la vitesse du vent dans une heure quelconque tend à dépendre fortement de la vitesse du vent dans l'heure précédente. Tandis que des valeurs faibles indiquent que la vitesse du vent tend à fluctuer dans un sens aléatoire d'une e 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 plus élevé (0,9-0,97) dans les endroits dont la topographie est plus uniforme. Dans notre application, nous avons supposé un facteur d'autocorrélation de 0,85 pour notre site.

✓ The diurnal pattern strength est une mesure de combien la vitesse du vent est fortement liée au temps dans la journée. Dans plusieurs locations, 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 fortement liée au temps dans la journée. Une valeur de 0,25 est supposée pour notre site.

Notre points d'intérêt étant focalisé sur la production hybride(pv,éolien,hydro,diesel) le choix de site ne présente pas une tache facile,chacun jouit d'un nombre d'avantages par rapport a l'autre,en se basant sur les conditions météorologiques dominantes, le choix s'est porté sur la préfecture de bouira.

III.4 Site d'implantation : La figure III.3 montre le site géographique sur la carte. La zone d'étude considérée est située dans la commune de Maala au Nord-Ouest de la wilaya de Bouira. Cette région est dotée d'un barrage d'eau d'une capacité de 600 millions de m3 et d'une hauteur de 121 m et qui s'étend sur une longueur de 15 à 20 km.



Figure III.3 : Site d'implantation

Tableau III.1 :LES Données géographiques

Caractéristiques géo / Site	**longitude**	**latitude**	**altitude**
Bouira(acerdoune)	**36 .1731° NORD**	3.2112°	301m

Tableau III.2 : Donneés correspendant au barrage (koudiat aserdoune)

Capacité de stockage d'eau	**La hauteur**
600000000 m³	**121 m**

III.5 Données metéorologiques :

III.5 .1 Les données relatives au rayonnement solaire :

Estimé sur une surface horizontale ,le rayonnement solaire journalier varie entre 2.209 kWh/m^2.j au mois de Decembre et 7.082 kWh/m^2.j au mois de Juillet avec une moyenne annuelle de 4.71 kWh/m^2.j.

III.5 .1.1 La variation mensuelle de l'irradiation :

A l'aide du logiciel homer et les indices de clarté correspendants aux données du site notés dans le**Tableau III.3 .**,

Tableau III.3 : l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois de l'année est déterminée :

Mois	L'indice de clarté	Irradiations (kWh /m²/j)
Janvier	0.486	2.369
Février	0.524	3.272
Mars	0.530	4.313
Avril	0.536	5.325
Mai	0.567	6.305
Juin	0.617	7.135
Juillet	0.628	7.082
Aout	0.656	6.725
Septembre	0.629	5.414
Octobre	0.561	3.757
Novembre	0.509	2.610
Décembre	0.486	2.209

Les moyenne mensuelles du rayonnement solaire global sur le plan horizontal ainsi que les indices de clarté pour chaque mois de l'année sont données sur la figure (II.4)

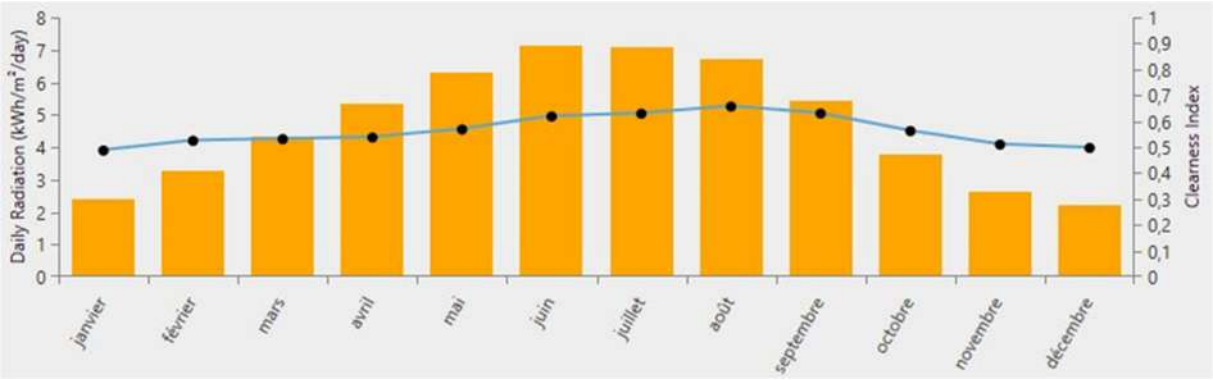


Figure III.4 : le rayonnement solaire global sur le plan horizontal

Le graphe suivant représente le rayonnement solaire global et le rayonnement solaire

Incident (kW /m²)

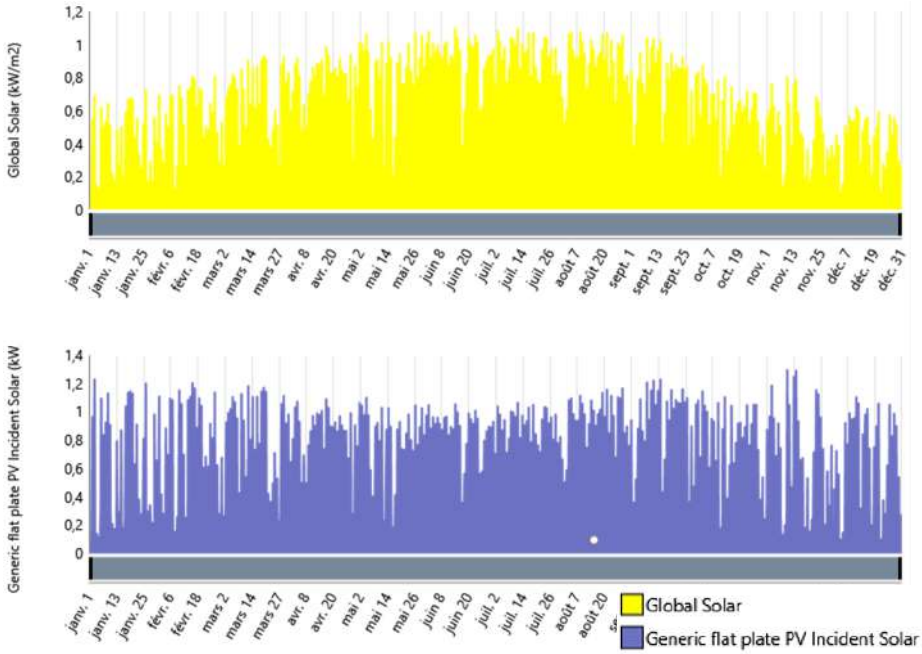


Figure III.5 : Rayonnements solaires global sur le plan horizontal et incident

Le graphe de la figure III.6 représente la température moyenne mensuelle pour chaque mois de l'année .Cette température a une influence sur les performances du système hybride de production d'énergie électrique.

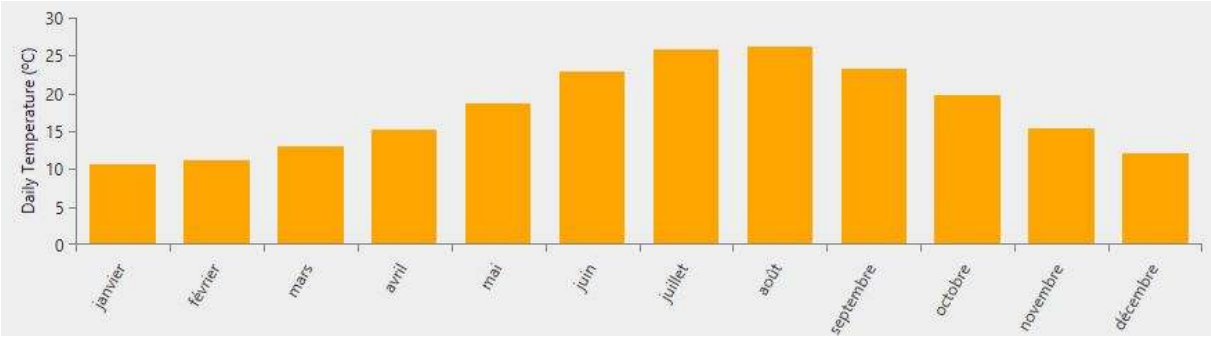


Figure III.6 :la température ambiante mensuelles

III.4.3 Les données relatives de la vitesse du vent :

L'heure du pic de la vitesse du vent, est simplement le temps dans la journée tendant à être le Plus venté en moyenne, durant l'année

Pour le gisement éolien on a procédés avec la même manière, à partir du logiciel Homer

— Enfin, la vitesse moyenne mensuelle du vent varie de 4.41 [m/s] au mois de juin jusqu'à 5.15 [m/s] au mois de février, avec une moyenne annuelle de 4.74 [m/s].

Le graphe suivant représente la vitesse moyenne mensuelle (m/s)



Figure III.7 : la vitesse mensuelle du vent (m/s)

III.4.4 Le débit d'eau :

C'est le volume d'eau dans une seconde de chute où l'énergie produite est proportionnelle au débit d'eau. Ce graphe représente le débit dans le barrage d'eau (koudiat aserdoune) au cours d'une année

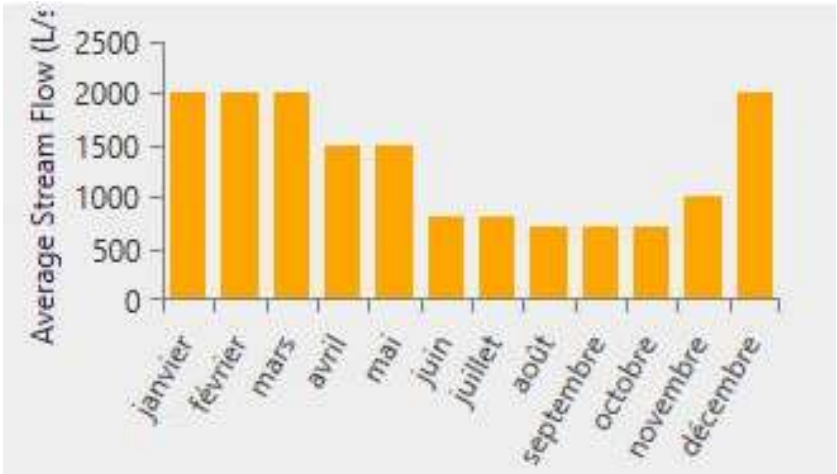


Figure III.8 : le débit moyen d'eau (L/S)

III.5 Bilan énergétique :

La donnée initiale dans la mise en œuvre d'un système de production à source d'énergie renouvelable comme pour tout autres systèmes énergétiques est la demande, qui va être déterminé par rapport à la charge 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 tache bien difficile.

La valeur du nombre d'heures de consommation est déterminée en fonction de consommation :

- L'éclairage qui dépend :

a - De l'heure du lever et du coucher du soleil qui est fonction de :

- la situation géographique du site ; *
- la correction due au décalage horaire par rapport au temps universel ;
- la correction due au décalage du faisceau de longitude du lieu (3 [mn/1) ;
- la correction due à la variation saisonnière de l'équation du temps.

b - Des heures du lever et du coucher des membres de la famille.

Les horaires relatifs au lever et au coucher du soleil en heure locale varient d'une saison à l'autre. Ainsi connaissant les heures du lever et du coucher de la famille, nous pouvons déterminer facilement le nombre d'heures de consommation relatif à l'éclairage d'une maison quelconque sur le lieu considéré.

- Equipements Le réfrigérateur pris comme exemple, le nombre d'heures de fonctionnement du compresseur dépend de la température du milieu environnante. C'est pour cette raison que cette durée diffère en fonction des diverses saisons.

La consommation électrique diffère d'un mois à l'autre et d'une saison à l'autre .cela dû au fait que le travail au niveau des écoles n'est pas régulier. Les weekends et les vacances scolaires influent sur la consommation.

Tableau III.4 : exemple d'une consommation journalière d'un foyer.

Puissance (W)	Equipements		Nombre	P. Totale (W)	Durée d'utilisation (heure)	consommation journalière maximale (Wh)
110	Réfrigérateur		1	110	24	2640
75	TV		1	75	7	525
22	Eclairage	Chambre d'adulte	1	22	4	88
22		Chambre d'enfants	1	22	5	110
22		Chambre de séjour	1	22	3	66
11		Cuisine	1	11	3	33
11		Salle bain	1	11	2	22
11		Toilette	1	11	2	22
22		Couloir	1	22	2	44
50	PC		1	50	3	150
40	Chaîne Stéréo		1	40	2	80
40	climatiseur		1	40	6 (été)	240
30	Démodulateur		1	30	7	210

Dans notre étude on a basé sur deux exemples de charges la première est une consommation de 2000 logements, et la deuxième est l'ensemble des consommations d'une clinique, poste, écoles et un lycée.

Les graphes suivants donnent Le profil de consomation journaliere ,suivant les saisons de

deux charges

la premiere charge :

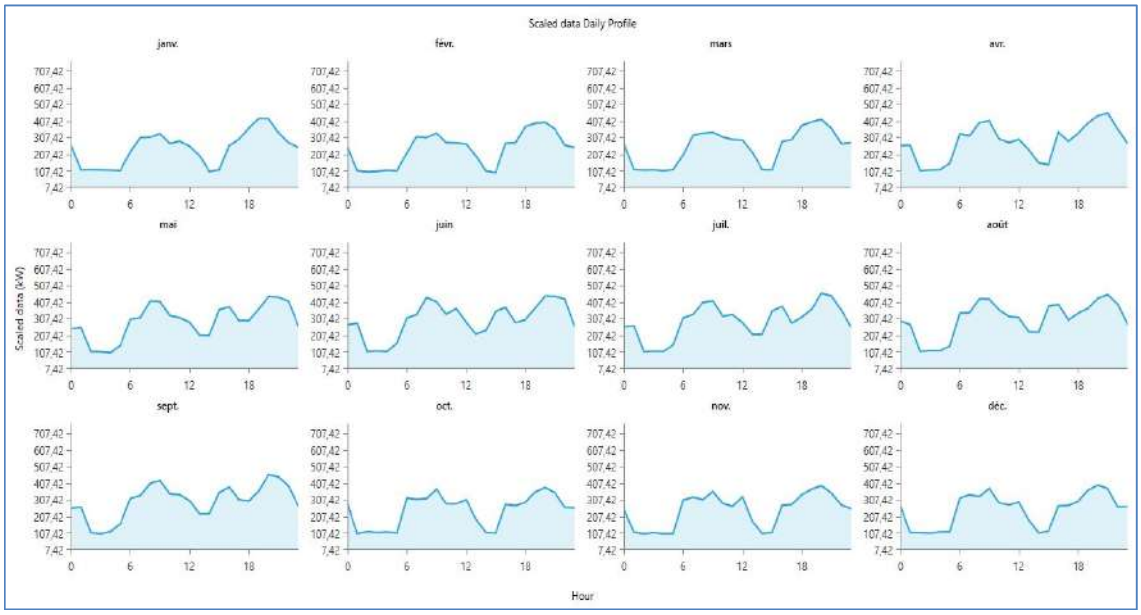


Figure III. 9 : le profil de charge mensuelle de l'ensemble des habitations

La deuxième charge :

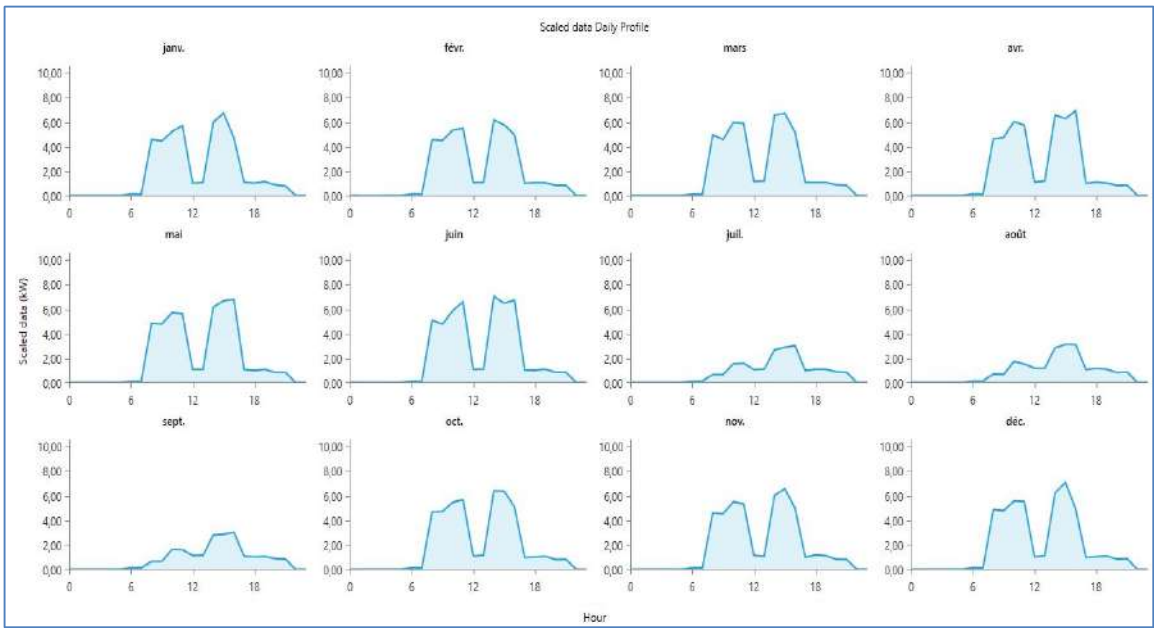


Figure III. 10 : le profil de charge mensuelle de la deuxième charge

III.6 Création du système hybride :

D'après la bibliothèque d'homer on peut insérer les différents élements de notre système hybride tels que les charges,les modules photovoltaiques,les aérogénérateurs,la turbine hydraulique,les groupes diesel,les convertisseurs de puissances et lessystèmes de stockage(batteries) .

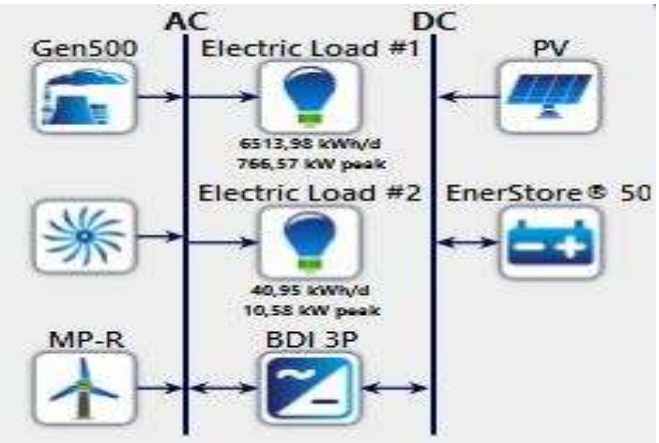


Figure III.11 : Configuration du système hybride optimal

III.6.1 Les configurations du système hybride :

Cette étude nous a permis de simuler des centaines de combinaisons de Configurations d'un système hybride à partir de plusieurs dimensions et nombres de composants. Nous allons dans cette partie présenter les caractéristiques techniques et économiques du système optimal.

Les caractéristiques techniques et économiques de la configuration optimale du système hybride PV/éolien/hydro/Diesel obtenus par simulation de Homer sont résumées dans le tableau suivant **III.5**:

Tableau III .5 Les caractéristiques techniques et économiques de la configuration optimale du système hybride PV/éolien/hydro/Diesel

Le coût de carburant (DA)	1945080	1997760	2034360	2053800	2086800
La maintenance et l'opération (DA)	23562000	24219000	24642000	24930000	25281000
Le carburant consommé (L)	124682	128062	130405	131653	133769
La production (kw)	435887	447644	455896	460095	467650
Heures	2618	2691	2738	2770	2809
La fraction d'énergie renouvelable	82	81	81	81	81
L'invistesment initial (DA)	89904600	88404600	88704600	86904600	87204600
Le prix de kw (DA)	17.04	17.20	17.46	17.61	17.76
Le coût d'opération	33777000	34549920	35048520	35385000	35799000
Turbine hydraulique (kw)	110	110	110	110	110
Nombre De batteries	40	35	40	30	35
Groupe diesel (kw)	500	500	500	500	500
Nombre de Turbine éolienne	3	3	3	3	3
Champ PV (kw)	220	220	220	220	220

III.7 Production énergétique du système hybride optimal :

la figure(III. 12*)* représente La production énergétique du système hybride



Figure III. 12 : la production électrique mensuelle (kw)

Dans le figure (III.12), on note que 44.78% de l'énergie annuelle produite par le système est une énergie hydraulique, tandis que 26.66% de cette énergie est une énergie éolienne. 12.46% sont produites par l'énergie photovoltaïque et 16.1% de l'énergie à partir de groupe diesel La charge consomme 94.1% de l'énergie totale produite et L'excès énergétique n'est pas important. Il est de l'ordre de 5.9%.et la fraction de l'énergie renouvelable arrive à 81.8% de l'énergie produite.

Les graphes suivants représentent la consommation journalière et l'énergie produite par les différents systèmes énergétique pour deux jours spécifiques.

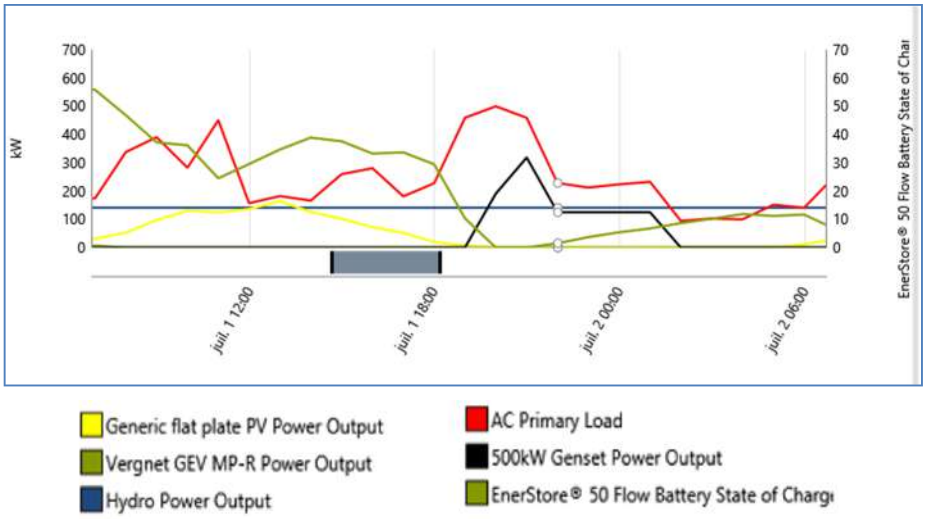


Figure III. 13 : l'énergie produite et la consommation dans une journée typique (01/07/2015)

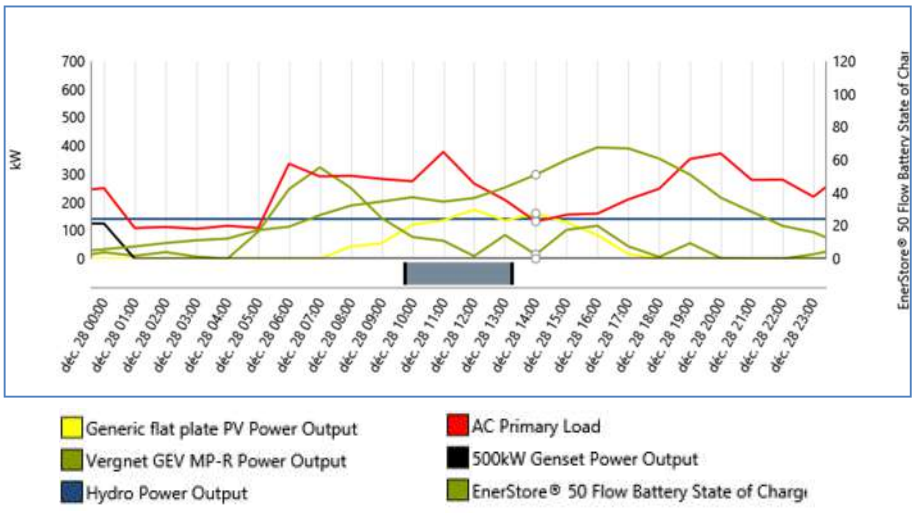


Figure III. 14 : l'énergie produite et la consommation dans une journée typique (28/12/2015)

On remarque que parmi les sources renouvelables dans notre système hybride seulement l'hydraulique qu'a une stabilisation de production et les autres énergies influencées par les données météorologique et même la consommations diffère de jour à l'autre et l'état de stockage par rapport au données météorologique, on remarque que la production éolienne est absente le 1er juillet à cause de l'absence du vent.

III.7.1 L'énergie produite par le système PV :

Le graphe de la figure III.15 représente l'énergie annuelle produite par le champ PV

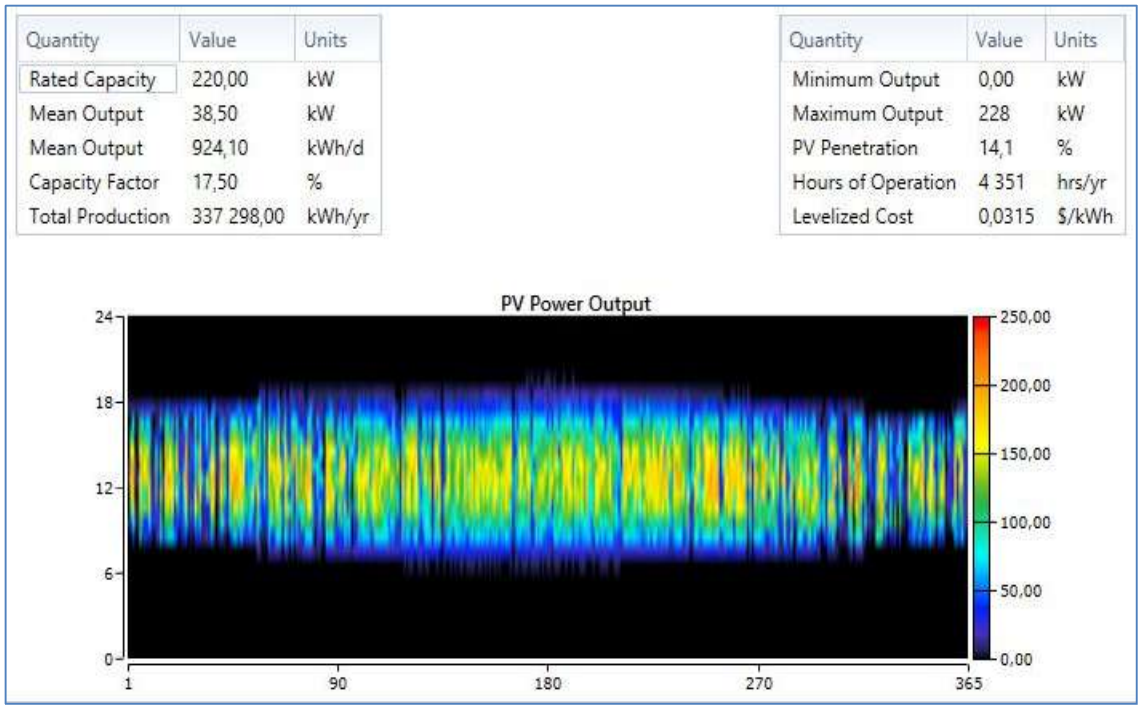


Figure III.15 : La production électrique annuelle du champ PV

III.7.1.1 La relation entre l'énergie produite et le rayonnement incident :

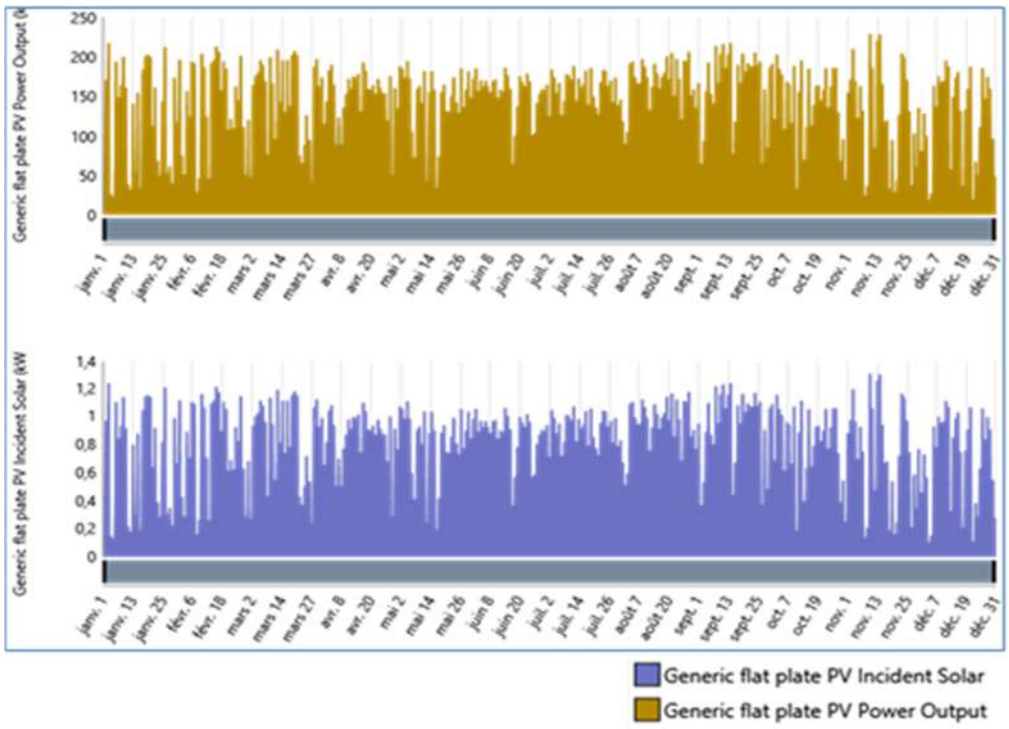


Figure III.16 :l'énergie produite par le champ PV et le rayonnement incident

Il Ya une corrélation entre l'énergie produite par les panneaux solaires et le rayonnement incident donc quand le rayonnement est important l'énergie produite aussi sera importante.

Le graphe suivant représente le rayonnement incident et l'énergie produite

III.7.2 L'énergie produite par le générateur diesel :

La figure III.18 représente l'énergie produite par le groupe diesel

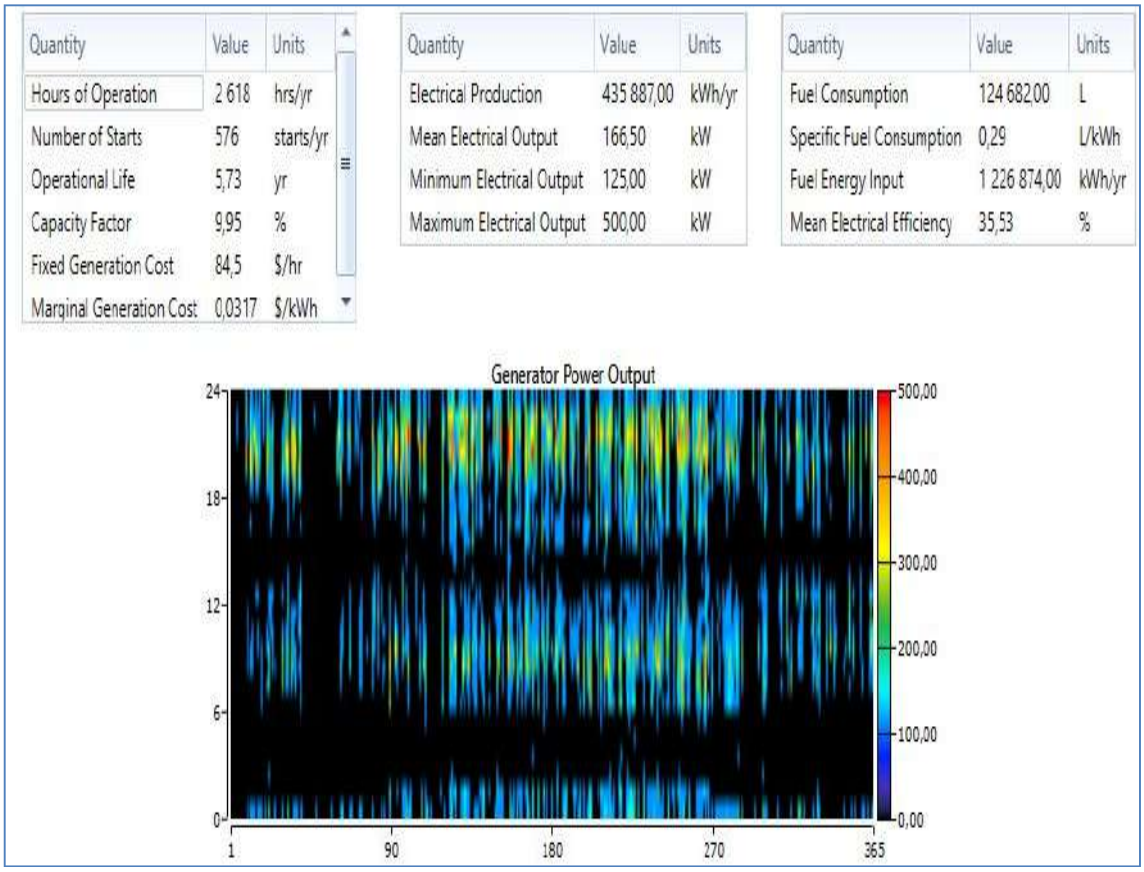


Figure III.17 : La production électrique annuelle du générateur diesel

III.7.2.1 Le rapport entre la consommation de carburant et l'énergie produite par le groupe diesel :

Il y a une relation entre la consommation de carburant et l'énergie produite donc quand la quantité de carburant consommée est grande l'énergie produite sera aussi grande et le contraire est vrai

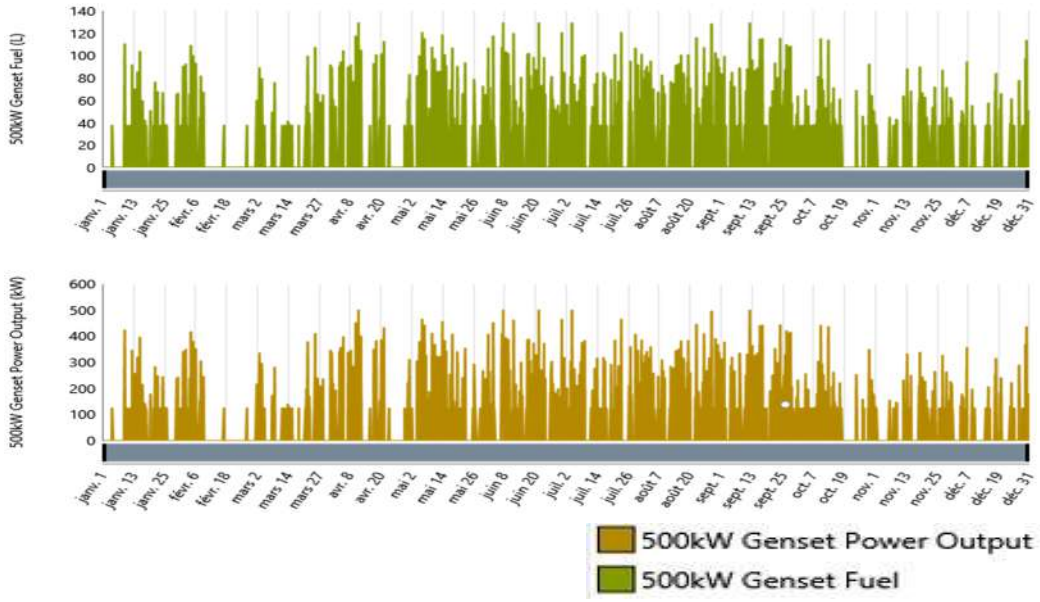


Figure III.18 :l'énergie produite par le groupe diesel et la consommation de carburant

III.7.3 L'énergie produite par les turbines éoliennes :

La production électrique annuelle des turbines éolienne représentée par la figure suivante :

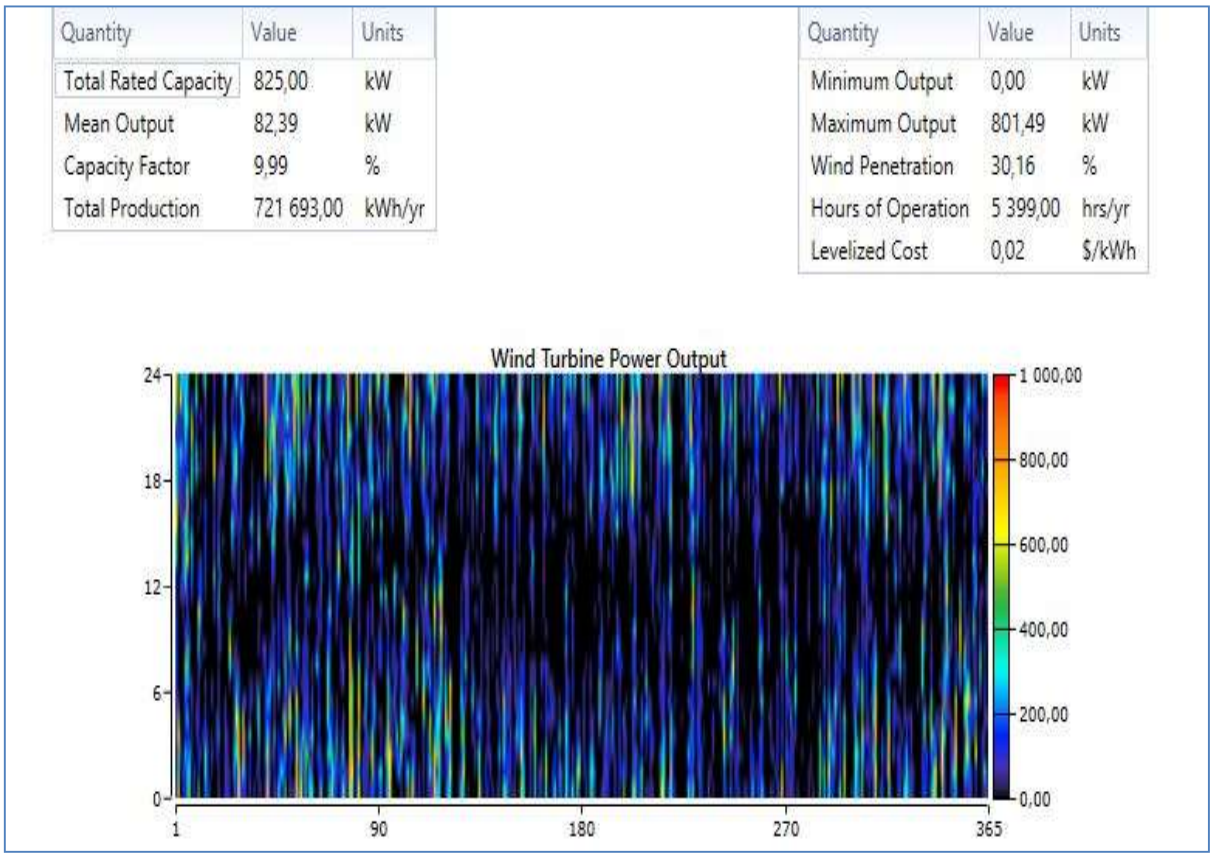


Figure III 19 : la production annuelle d'électricité par la turbine éolienne

III.7.3.1 Le rapport entre la vitesse du vent et l'énergie produite par la turbine éolienne :

La vitesse du vent influe sur l'énergie produite par la turbine éolienne proportielement lorsque la vitesse du vent est grande la production augmente ,et c'est possible que la turbine éolienne s'arrete Quand la vitesse du vent raparoche à des petites valeurs ou un excés de vent.

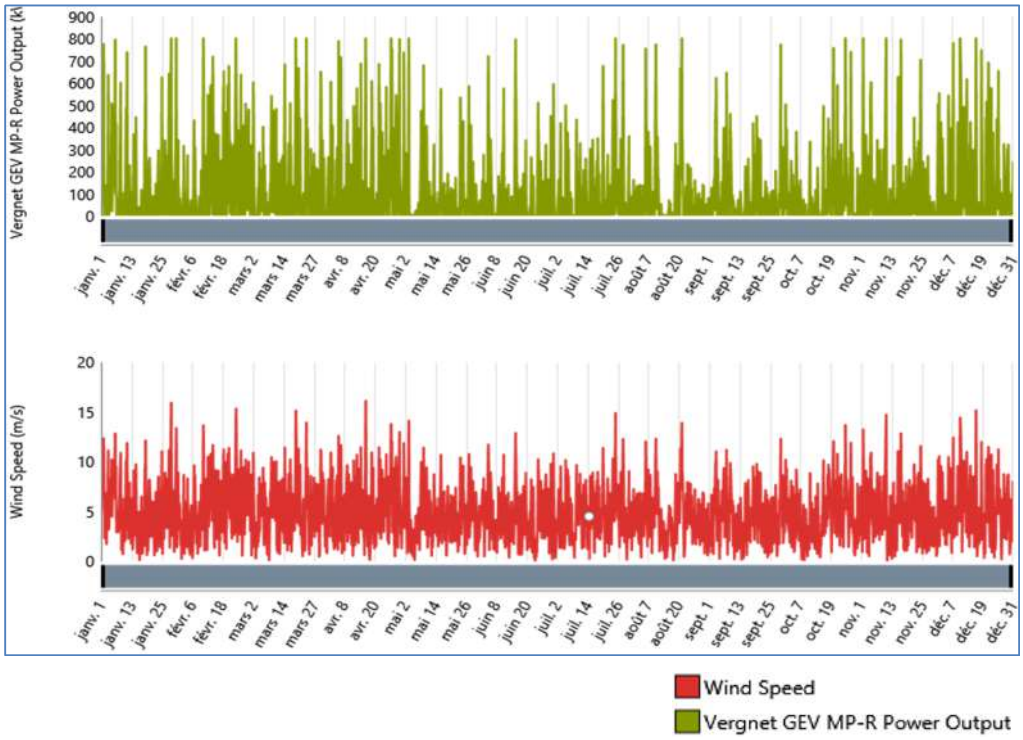


Figure III. 20 :l'énergie produite par la turbine éolienne et la vitesse du vent

III.7.4 L'énergie produite pa1r la turbine hydraulique

Le graphe de la figure III.21 représente l'énergie produite par les système hydraulique

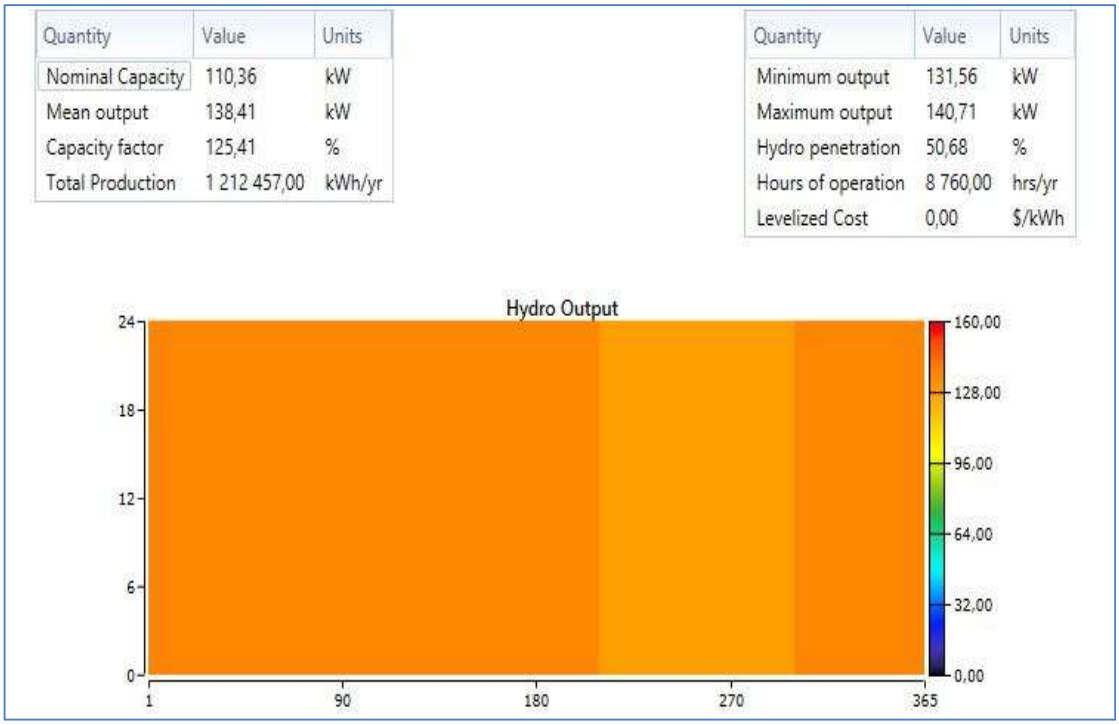


Figure III. 21 : La production électrique annuelle de turbine hydraulique

III.7.4.1 Le rapport entre le débit et l'énergie produite par la turbine hydraulique :



Figure III. 22 ***:*** énergie produite par la génératrice hydraulique/ débit d'eau

On remarque que l'énergie produite par la turbine hydraulique est relié directement au débit, Donc il Ya une corrélation entre les deux et la turbine hydraulique marche dans des plages suivantes :

Quand le débit varie entre 2000 L/S et 750 L/S l'énergie produite est de l'ordre de 141 KW et la deuxième plage varie entre 750L/S et 550L/S et l'énergie produite dans cette plage est 132KW

L'état de charge des batteries :

La figure suivante donne l'état de charge des batteries

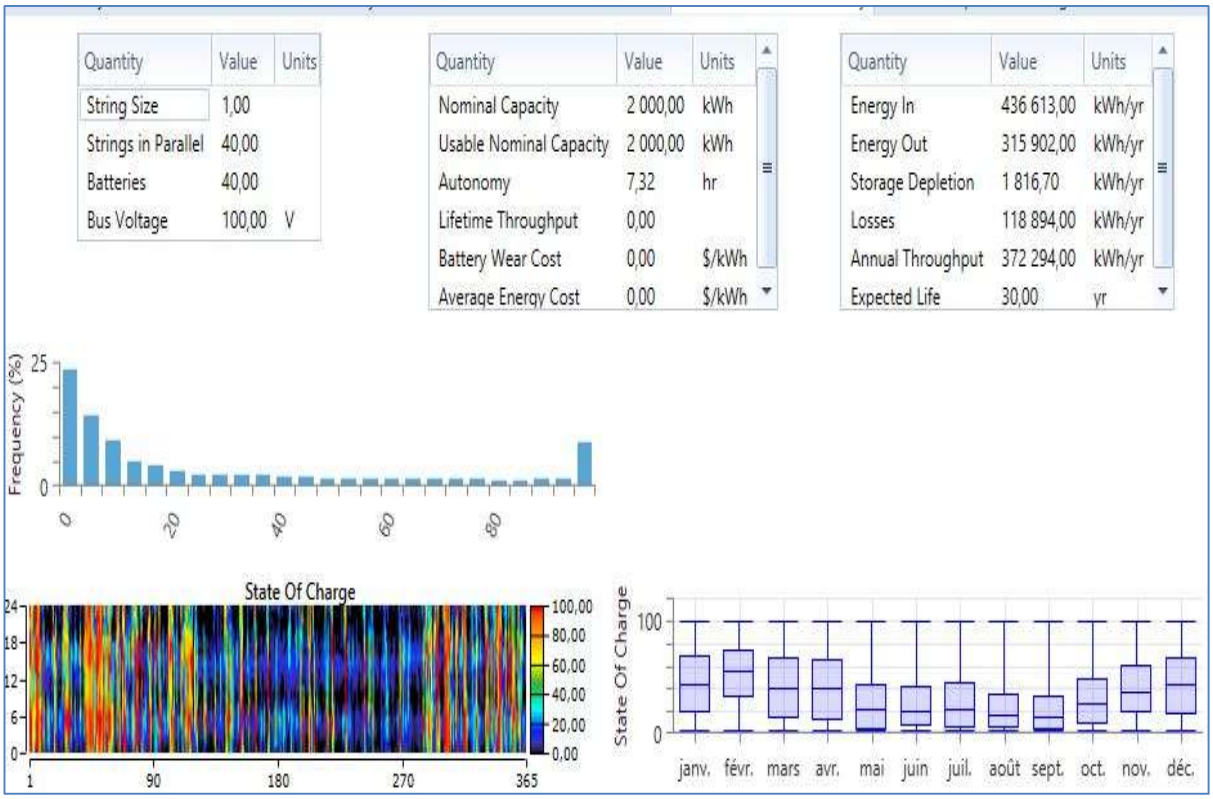


Figure III. 23 : Les résultats statistiques du système de batteries

D'après les résultats que nous avons obtenu dans la figure précédente on peut remarquer que la consommation d'énergie à partir des batteries augmente durant la période d'été, la cause de cette consommation massive de l'énergie stocké est les données météorologique car la production d'énergie d'autre ressources se diminue (éolienne et hydraulique).

Tableau III.6 : Coût du système hybride

TOTAL	16650120 DA	23924040 DA	2694360 DA	375778680 DA	33859440 DA	39758040 DA	59046720 DA	599337160 DA
salvage	00 DA	-3868680 DA	-73814,4 DA	-2415480 DA	-295080 DA	-1674120 DA	00 DA	-7990080 DA
Coût de Carburant	00 DA	00 DA	00 DA	25418880 DA	00 DA	00 DA	00 DA	25418880DA
Coût de maintenance	3450120 DA	00 DA	1568280 DA	307920960 DA	2157840 DA	14114040 DA	47046720 DA	382608240 DA
Coût de remplacements	00 DA	6828 .120 DA	00 DA	29434560 DA	19996680 DA	12198120 DA	00 DA	68864160 DA
Coût d'investissement	13200000 DA	20964600 DA	1200000 DA	15420000 DA	12000000 DA	15120000 DA	12000000 DA	89904600 DA
Les composants	**Générateur PV**	**Turbine éolienne**	**Turbine hydraulique**	**Groupe diesel**	**Batteries**	**Convertisseurs**	**Autre**	**Système**

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthode d'optimisation et de dimensionnement adoptée par le logiciel Homer pour les systèmes hybrides à énergies renouvelables.

Les résultats de simulation ont donné un coût d'investissement du système hybride de 599337160 DA et un cout d'énergie de 16 ,92 DA qui peut être compétitif par rapport au système conventionnel.

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons utilisé un modèle de dimensionnement optimal pour une alimentation en électricité d'un village prés du barrage d'eau Acerdoune avec un système hybride d'énergie, constitué des panneaux solaires, éolienne, turbine micro-hydraulique, générateur diesel et des batteries de stockage, d'une manière économique implanté dans la région Nord-Ouest à Bouira.

A travers ce projet d'étude nous avons traité les points suivants :

1. Elaboration d'une base de données sur la vitesse du vent, le rayonnement solaire et le potentiel hydraulique de la région de Nord-Ouest de Bouira. On a constaté, d'après les résultats obtenus pour ce site, que cette région dispose des gisements solaire et éolien très importants. La durée d'insolation dépasse 2000 heures annuellement. L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de $1m^2$ peut dépasser 7 kWh/m^2 dans la période d'été et annuellement elle est de l'ordre de 1780 kWh/m^2 pour un plan horizontal et peut dépasser 2000 kWh/m^2 pour une inclinaison optimale mensuelle ou saisonnière et du coté vent nous avons conclu que la région bénéfice des couloirs ventés qui peuvent additionner avec le solaire pour former des systèmes hybrides. Concernant les ressources hydriques cette région dispose d'un potentiel hydraulique très important. Le barrage possède une capacité de 600 millions de m^3 et une hauteur de 121 m.
2. Modélisation des systèmes hybrides : éolien et solaire. Ce point nous a aidé à comprendre les mécanismes de fonctionnement de chaque sous système et de sélectionner un ensemble de modules photovoltaïques et éoliens de petite puissance adaptée pour générer de l'électricité à partir du vent et les ressources solaire et hydraulique disponibles dans cette région. Pour le système d'appoint nous avons opté au générateur Diesel et au système de stockage qui peuvent compenser les moments d'insuffisance d'énergie.
3. Dimensionnement du système hybride : Nous avons dimensionné un système hybride éolien /solaire/micro-hydro pour notre application. Ce dimensionnement s'est fait à l'aide du logiciel Homer dans le but de choisir le système hybride optimal qui présente une bonne fiabilité avec un coût minimal afin d'éviter tout sous-dimensionnement ou surdimensionnement du système.

D’après l’analyse faite sur les résultats, la combinaison des 3 sources d’énergie reliées à un système d’appoint (génératrice Diesel) engendre un profit énergétique considérable (présence permanente d’énergie électrique).

L’étude économique montre clairement l’avantage de l’énergie conventionnelle par rapport à ces systèmes mais avec la hausse du prix des carburants et l’épuisement de ses ressources, les systèmes hybrides d’énergie contenant l’éolien, le solaire l’hydraulique constituent l’avenir prometteur des technologies d’énergie pour les collectivités de l’Algérie dans un proche avenir.

Aujourd’hui il n’existe pas de pays disposant de ressources encore mobilisables qui ne se préoccupe pas de développer son cadre énergétique des lors que tout développement est étroitement lié à l’indépendance énergétique. C’est dire que le défi de l’autosuffisance énergétique est un enjeu de taille surtout pour le monde rural qui vit essentiellement de l’agriculture et de l’élevage. Pour contribuer à la solution aux problèmes d’énergie, il est intéressant de développer des sources décentralisées de ces énergies. Dans la recherche de telles solutions, les systèmes hybrides étudiés ici pourront constituer un moyen très économique pour l’approvisionnement en énergie des sites ruraux.

Etant donné son étendue, cette étude ne prétend pas avoir répondu à toutes les questions. Au contraire elle ouvre la porte à des études plus précises et plus profondes. Nous espérons de ce mémoire que les résultats présentés dans ce document susciteront suffisamment d’intérêt pour ouvrir la voie à d’autres recherches et qu’ils inciteront, dans un proche avenir des décideurs à investir dans l’amélioration de l’efficacité énergétique et mener notre pays à aller vers une transition énergétique rigoureuse et basée sur les énergies renouvelables.

Bibliographie

[1]A. Labouret, thèse master 'Energie solaire photovoltaïque', Dunod, France 2005.

[2] T .Markvart, these doctorat 'Sizing of hybrid photovoltaic-windenergysystems'. Solar Energy1996;

[3] Gilles Notton et Marc Muselli ,thèse master **'**Utilisation rationnelle de l'énergie et énergies renouvelables, des alliés incontestables : application à une production décentralisée d'électricité photovoltaïque' Université de Corse - Centre de Recherches (Energie et Systèmes) France

[4] A. El Khadimi , L. Bchir et A. Zeroual thèse doctorat **'**Dimensionnement et Optimisation Technico-économique d'un Système d'énergie Hybride Photovoltaïque - Eolien avec Système de Stockage' Rev. Energ. Ren. Vol. 7 (2004) 73-83

[5]Yann Pankow , Thèse de doctorat 'Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque' ;, Décembre 2004, ENSAM de Lille.

[6] Markvart T, Thèse de doctorat 'PracticalHandbook of photovoltaics:fundamentals and applications, Elsevier edition 2003

[7] MukundP.Patel, 'Thèse de doctorat ,Wind and solar Power Systems', CRC Press 1999.

[8] Erich Hau ,Thèse de doctorat, 'Wind Turbines :fundamentals, technologies, application, economics', second édition Springer édition 2006

[9] L'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV /Eolien

[10] présenté par Sultane BELAKEHAL these de doctorat Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables.

[11]http://www.riaed.net/?Hydroelectricite-et-centrales

[12] Ian GRAHAM these de doctorat « Les énergies en questions, l'énergie hydraulique » de, édition GAMMA – Ecole active

[13] verte présent par M. Belatel*, F. Benchikh, Z. Si Mohamed, F. Ferhat et F.Z. Aissous thèse de master, Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, 'LEC' Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Mentouri Route Ain-El-Bey, Constantine, Algérie (reçu le 29 Novembre 2010 – accepté le 30 Mars 2011)

[14] présenté Deepak Kumar Lal, BibhutiBhusanDash, et A. K. Akella,Optimization,these de doctorat of PV/Wind/Micro-Hydro/Diesel Hybrid Power System in HOMER for the Study Area Department of Electrical Engineering VSS University of Technology, Odisha, Sambalpur-768018, INDIA , Department of Physics, Silicon Institute of Technology, Sambalpur-768200, INDIA , Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Jamshedpur-831014, INDIA

[15] présentée par gueridi Amina , these doctorat , dimensionnement d'un système hybride pour subvenir aux besoins de l'université de chlef , université hassiba ben bouali de chlef faculté des sciences et science de l'ingénieur département de mécanique ,la date de soutenance le 20/11/2011

[16]Cost Benefit Analysis of Self-Optimized Hybrid Solar-Wind-Hydro ElectricalEnergySupply as compared with HOMER Optimization