

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE



En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Energies Renouvelables

Option : Energies Renouvelables en mécanique

Thème

**Optimisation d'un système hybride Eolienne- Photovoltaïque- Diesel**

**Cas l'hôpital de THENIA**

Promoteur : Mr. Le professeur : HACHEMI MESSAOUD

CO. Promoteur : Dr. Belhous

Présenté Par :

**Abdelli Aouatef**

**Sellami Roumaissa**

*Promo : 2017-2018*

## Remerciements

*Avant tout, nous tenons à remercier ALLAH le tout-puissant de nous avoir donné la santé, le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans les meilleures conditions.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude en premier lieu à notre encadreur, Mr. le Professeur HACHEMI MESSAOUD pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité, aussi, nous tenons à le remercier vivement car nous sommes les premiers binômes en énergétique à avoir l'honneur de travailler sous sa direction, nous le remercions pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie.*

*Egalement, nous remercions notre Co-encadreur Dr.BELHOUS pour son entière collaboration.*

*Nous adressons aussi nos remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font d'évaluer ce modeste travail.*

*A l'ensemble des enseignants du département génie mécanique, et plus spécialement Mr.BRACHEMI.*

## Dédicace

*Pour que ma réussite sois complète, je tiens à dédier et à partager ce modeste travail avec toutes les personnes que j'aime :*

*A mes très chers parents qui n'ont pas cessé de prier pour moi et qui m'ont aidé durant tout mon cursus universitaire, que Dieu les garde pour nous.*

*Je le dédie également à mon petit frère LOTFI qui a eu son BEM.*

*A mes très chères frères, MEHDI spécialement, à HICHEM, et à mes chères sœurs HIND, CHAHRA, KARIMA qui n'ont ménagé aucun effort et moyens pour que ma réussite soit totale.*

*A mes très chères belle sœurs AMIRA spécialement, LILIA, et MANEL.*

*A mon binôme et meilleure amie ROUMAÏSSA, surnommée RORO avec qui j'ai partagé mes plus beaux moments sans oublier sa famille.*

*A ceux que j'ai eu la chance de connaître, dans les meilleurs et pires moments de ma vie, à mes amis les plus fidèles MARYEMME, MIMICHT, HAYET, spécialement WADE TAMSIR, YURI mon frère et JAMYLA.*

*A tous ceux que j'aime, à tous ce qui aime AOUATEF.*

## *Dédicace*

### ***Je dédie ce modeste travail :***

*A ma très chère mère qui m'a tout donné, de son amour, ses sacrifices pour que je puisse avoir une vie pleine de belles choses et qui ne cesse de m'encourager et de veiller pour mon bien. Sans son soutien ce travail n'aurait jamais vu le jour.*

*A mon père qui m'a toujours soutenu moralement, m'a encouragé et m'a poussé à poursuivre mes études que Dieu le garde en bonne santé.*

*A ma très chère sœur SARAH RANDA.*

*A mes très chers frères.*

*A ma binôme la plus fidèle avec laquelle j'ai partagé les plus beaux et les pires moments.*

*Je le dédie également à mes meilleurs amis et amies, spécialement SOHABI. HILEL MAHIE EDDINE et sa mère et les petites OMAIMA, KHADIDJA , et ROUMAÏSSA.*

*A tous ceux que j'aime, et à tous ceux qui m'aiment.*

<b>Introduction generale</b> .....	(1)
<b>Chapitre I : Etat de l'art du système hybride éolien-photovoltaïque-Diesel</b> .....	(2)
i.1. Etat de l'art du système hybride éolien-photovoltaïque-diesel .....	(3)
I.2. La chaîne de production photovoltaïque.....	(4)
I.2.1. Le rayonnement solaire.....	(5)
I.2.2. Effet photovoltaïque .....	(6)
I.2.3. Principe de la génération photovoltaïque.....	(7)
I.2.4. Convertisseurs DC/DC.....	(8)
I.2.5. Convertisseurs DC/DC à pilotage MPPT.....	(9)
I.2.6. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC.....	(10)
I.2.7. Les avantages.....	(11)
I.2.8. Les inconvénients .....	(12)
I.3. La chaîne de production éolienne.....	(13)
I.3.1. Le Génie Electrique dans le vent.....	(14)
I.3.2. Les type d'aérogénérateurs.....	(15)
• Eoliennes à axe vertical.....	(16)
• Eoliennes à axe horizontal.....	(17)
I.3.3. Choix de technologie de l'éolienne.....	(18)
I.3.4. Architecture d'une éolienne à axe horizontale.....	(19)
I.3.4.1. Rotor.....	(20)
I.3.4.2. Nacelle.....	(21)
I.3.4.3. Multiplicateur de vitesse .....	(22)
I.3.4.4. L'arbre secondaire .....	(23)
I.3.4.5. Génératrice .....	(24)
I.3.4.6. Contrôleur électronique .....	(25)
I.3.4.7. Dispositif d'orientation de la nacelle .....	(26)
I. 3.4.8. Tour .....	(27)
I.3.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	(28)
I.3.6 Conversion électrique d'énergie éolienne.....	(29)
I.3.6.1. Machines électriques et systèmes (de conversion d'énergie éolienne).....	(30)
I.3.6.2. Machines synchrones à aimants permanents.....	(31)

I.3.7. Redresseur.....	(32)
I.3.8. Le dispositif de stockage .....	(33)
I.3.8.1. Caractéristiques déterminant le choix d'une technologie de stockage .....	(34)
I.3.9. Fonctionnement d'un accumulateur au plomb .....	(35)
I.3.10. Bus à courant continu.....	(36)
I.3.11. Hacheur réversible en courant.....	(37)
I.3.12. Onduleur.....	(38)
I.3.14. Structure d'onduleur.....	(39)
I.3.15. Classification des onduleurs .....	(40)
I.4.1. Description.....	(41)
I.4.1. le générateur Diesel .....	(42)
I.4.2. Les caractéristiques de générateur diesel.....	(43)
I.4.3. Gestion correspondant au générateur Diesel.....	(44)
I.4.4. Les avantages et les inconvénients .....	(45)
Conclusion .....	(46)
<b>Chapitre II : Modalisation d'un système hybride .....</b>	<b>(47)</b>
Introduction .....	(48)
I.1. Modélisation de la chaîne photovoltaïque.....	(49)
II.2.1. Modélisation du rayonnement solaire.....	(50)
II.2.1.1. Coordonnées géographiques terrestres.....	(51)
II.2.1.2. Position du soleil.....	(52)
II.2.1.2. 1. Coordonnées équatoriales .....	(53)
II.2.1.2.2. Coordonnées horizontales.....	(54)
II.2.1.3. L'angle d'incidence du rayonnement direct sur un plan incliné.....	(55)
II.2.1.4. Calcul de rayonnement solaire horaire sur un plan incliné.....	(56)
II.2.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	(57)
II.2.2.1. Paramètres d'une cellule PV .....	(58)
II.2.2.1.1. Le courant de court circuit.....	(59)
II.2.2.1.2. La tension de circuit ouvert.....	(60)
II.2.2.2. Association de Cellules Photovoltaïques.....	(61)
II.2.2.3. Modélisation du générateur PV .....	(62)
II.2.2.3.1. Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque .....	(63)
II.2.2.3.2. Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque.....	(64)
II.2.2.3.3. Rendement d'un générateur photovoltaïque.....	(65)

II.2.2.3.4. Facteur Déforme .....	(66)
II.2.2.3.5. Influence de l'intensité du rayonnement.....	(67)
II.2.2.3.6. Influence de la température .....	(68)
II.3. Modélisation de la chaine éolienne.....	(69)
II.3.1. Modèle du vent .....	(70)
II.3.1.1. Correction de la vitesse de vent avec l'altitude.....	(71)
II.3.1.2. Distribution de Weibull.....	(72)
II.3.2. Modèle de la turbine.....	(73)
II.3.2.1. Puissance récupérable par une turbine.....	(74)
II.3.2.2. Loi de Betz.....	(75)
II.3.2.3. Vitesse normalisée.....	(76)
II.3.2.4. Coefficient de puissance.....	(77)
II.3.2.5. Coefficient de couple.....	(78)
II.3.3. Modèle de l'arbre de la machine .....	(79)
II.3.4. Modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents.....	(80)
II.3.5. Modélisation du redresseur .....	(81)
II.3.5.1. Etude d'un redresseur monophasé à diode .....	(82)
II.3.5.2. Rappel sur les règles de conduction d'une diode .....	(83)
II.3.5.2. Modèle d'un pont de diode .....	(84)
II.3.6. Puissance éolienne produite.....	(85)
II.4. Modélisation du dispositif de stockage.....	(86)
II.5. Modélisation du hacheur réversible en courant.....	(87)
II.5.1. Modélisation de l'onduleur.....	(88)
Conclusion .....	(89)
<b>Chapitre III : simulation de système hybride .....</b>	<b>(90)</b>
Introduction .....	(91)
III .1. Présentation du logiciel « HOMER ».....	(92)
III.1.1. Fonctionnement de HOMER.....	(93)
III.1.2. Optimisation.....	(94)
III.1.3. Analyse de sensibilité.....	(95)
III.2. PRÉSENTATION DE L'EPH THENIA.....	(96)
III.3. Simulation numérique du système hybride.....	(97)
III.3.1. Situation géographique .....	(98)
III.3.2. Les données météorologique .....	(99)

III.3.3.La variation horaire des vitesses du vent.....	(100)
III.3.4.Potentiel solaire de Thenia .....	(101)
III.3.5.La variation horaire de l'irradiation solaire.....	(102)
III.3.6.La charge horaire de l'hopitale de Thenia .....	(103)
III.4.Simulation de système hybride .....	(104)
III.4.1.Générateur existant .....	(105)
III.4.2 :Aérogénérateur proposée.....	(106)
III.4.3.Batterie de stockage .....	(107)
III.4.5.CONVERTISSEURS .....	(108)
III.5.Les scénarises.....	(109)
a)- scénario 1 .....	(110)
b)-Scénario 2 .....	(111)
Nouvelle conception.....	(112)
c)Scénario 3 .....	(113)
d)-Scénario 4.....	(114)
Conclusion.....	(115)
<b>Chapitre IV : Résultats et discussions.....</b>	<b>(116)</b>
Introduction.....	;(117)
IV.1.l'existant.....	(118)
IV.1.1.Scenario 1.....	(119)
IV.1.1.1Cout du système .....	(120)
IV.1.1.2.Production électrique.....	(121)
IV.1.1.3.les émissions .....	(122)
IV.1.2.Scénario .....	(123)
IV .1.2.1. Cout de système.....	(124)
IV.1.2.2.Production électrique.....	(125)
IV.1.2.3.les émissions .....	(126)
IV.2.la proposition .....	(127)
IV.2.1.Scénario 3.....	(128)
IV.2.1.1.cout du système .....	(129)
IV.2.2.2.Production électrique.....	(130)
IV.2.1.3.Les émission .....	(131)
IV.2.2.Scénario 4.....	(132)
IV.2.2.1.coutdu système .....	(133)

## SOMMAIRE

IV.2.2.Production électrique .....	(134)
IV.2.2.3.les émissions.....	(135)
VI.3.Comparaison des scénarios .....	(136)
VI.3.2.1.Le cout des systèmes.....	(137)
VI.2.2.2. Prodction électrique des système .....	(138)
VI.3.2.3.Les émissions des systèmes .....	(139)
Conclusion.....	(140)

## ABREVIATIONS

vitesse axiale du vent en amont de l'éolienne

$U^{\rightarrow}$  vecteur unitaire tangent à la pale

$T_{sv}$  : temps solaire vrai

$T_L$  : temps légal (donnée par une montre)

$E_T$  : l'équation  $\overline{V_0^{\rightarrow}}$  de correction du temps

$L$  : longitude du lieu

$T_a$  : Température ambiante,

Noct : Température nominale de fonctionnement de cellules,

$T_{aNoct}$  : Température ambiante à Noct ,

$G$  : Rayonnement solaire,

$G_{Noct}$  : Rayonnement solaire à Noct

$I_{cc\_ref}$  : Courant de court-circuit de référence,

$\alpha_{icc}$  : Coefficient de température du courant de court circuit,

$\rho$  : Densité volumique de l'air ( $Kg/m^3$ )

$v$  : Vitesse instantanée du vent (m/s)

$E_c$  : Energie cinétique du vent (Joules).

Pv : Photovoltaïque

AM : Air Mass

Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal)

IGBTS (transistors bipolaires à gâchette isolée)

(GPV) : générateur photovoltaïque.

(SMES) : Super conductor Magnetic Energy Storage.

(FES) : Flywheel Energy Storage).

( $\Delta GMT$ ) : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

CC : courant continu

CA :courant alternatif

I : Intensité

V : tension

### **Introduction générale**

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que les consommations d'énergie ont tendance à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, et ce quels que soient les cas de figures envisagés. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles puisque une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir du : charbon, gaz naturel, pétrole et l'uranium ....

Les énergies renouvelables sont des énergies dont la source est illimitée et non polluante et dont l'exploitation cause le moins de dégâts écologiques, c'est à dire: l'ensoleillement, le vent, le mouvement de l'eau dans les cours d'eau ou les mers, les matières organiques et la chaleur des entrailles de la terre (les spécialistes ne s'accordent pas tous sur le terme renouvelable de la géothermie).

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

En Algérie et dans le cadre de la politique énergétique nationale, la mission dévolue au secteur de l'énergie est de fournir à l'ensemble de la population, sur tout le territoire national, l'énergie dans les meilleures conditions en termes de qualité et de continuité de service. Par ailleurs, la satisfaction de ces besoins obéit à une préoccupation d'optimisation des coûts de mise à disposition de l'énergie et ce, pour sauvegarder les ressources de la collectivité nationale.

Du fait de la large disponibilité des hydrocarbures et de leur faible coût de mise à disposition, par rapport aux énergies renouvelables, les besoins énergétiques de l'Algérie sont satisfaits, presque exclusivement, par le pétrole et le gaz naturel. Ceci n'exclut pas l'intérêt des énergies renouvelables qui est sous-tendu par les avantages de celles-ci:

- dispersion dans l'espace. Elles peuvent, par conséquent, être utilisées partout où elles se trouvent.

- un potentiel important, particulièrement le solaire. L'Algérie est le premier gisement du bassin méditerranéen

- caractère non polluant.

Du fait de ces avantages et de certaines contraintes qui les caractérisent, notamment en termes de coûts, le rôle qui est dévolu aux énergies renouvelables, dans le cadre de la politique énergétique nationale, est de répondre à la demande énergétique sur les sites isolés et loin des réseaux d'électricité. (Électrification au solaire des villages du grand sud, etc....) que dans d'autres secteurs de l'économie nationale (balisage des routes, pompage de l'eau, etc....), Pour répondre à ces préoccupations, de plus en plus de pays mettent en place des politiques incitant à l'économie de l'énergie, mais aussi à la production d'énergie grâce à d'autres moyens souvent qualifiés de propres en référence au fait qu'il ne génère pas de dioxyde de carbone. Ces moyens de production sont principalement issus des énergies renouvelables, c'est-à-dire dont les ressources sont inépuisables par nature. Parmi celles-ci on peut citer l'énergie éolienne (issue du vent), et l'énergie (solaire).

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

- Le premier chapitre présente et expose un bilan des différentes parties et différentes structures rentrant dans le cadre de la production photovoltaïque et éolienne et diesel, les avantages et les inconvénients de chaque système de production.

- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation et la modélisation des différentes chaînes de production, et où on puisse faire la simulation (Homer) pour la combinaison. Une tâche très essentielle nous permet de prédire l'évolution de ces systèmes et les problèmes rencontrés lors de la réalisation pratique.

- le troisième on procédera à la présentation du logiciel utilisé (HOMER), et la présentation du site de l'hôpital de Thénia avec ses coordonnées géographiques et l'évolution de ses ressources éolienne, solaire et l'estimation des besoins énergétiques.

- le quatrième chapitre est réservé à la présentation des résultats de simulation effectués par HOMER, suivi d'une comparaison entre les différents scénarios considérés.

# **CHAPITRE I**

## **ETAT DE L'ART D'UN SYSTEME hybride**

---

## INTRODUCTION

La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables, offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux.

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, les énergies (solaire et éolienne) ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement, combinées avec un générateur diesel C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces trois sources d'énergies, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles. Certes, du point de vue économique les résultats apparaissent assez convaincants quant à la rentabilité du système hybride ci-dessus désigné, mais cela n'exclut pas le fait que la combinaison des trois sources constitue un système assez complexe du point de vue technologique.

Dans ce chapitre, il sera exposé la description et le principe de fonctionnement de différents composants du système hybride éolien-photovoltaïque-diesel. Le générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur et le diesel avec ces composants, les convertisseurs de puissance seront présentés. Le système de stockage sera présenté aussi en fin du chapitre.

### **I.1. Etat de l'art du système hybride éolien-photovoltaïque-Diesel**

Le système hybride de production d'énergie est celui qui combine et exploite plusieurs sources d'énergies. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolien et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante, ce qui exige l'utilisation d'un système de stockage.

En plus des sources d'énergie renouvelable, un système hybride peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif(CA), un système à courant continu(CC), un système de stockage, des convertisseurs de puissance, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution [1].

Dans notre système, présenté dans la figure 1.1 les chaînes de production se composent de :

- Des panneaux photovoltaïques connectés au bus continu à travers des convertisseurs DC/DC à pilotage MPPT.
- Une éolienne reliée au bus continu à travers un redresseur à diodes.
- Un générateur diesel connecté au bus alternatif.

- Le dispositif de stockage de l'énergie, composé des batteries électrochimiques, est relié au bus continu à l'intermédiaire d'un contrôleur de charge / décharge. Le bus continu est relié de son côté aux charges alternatives via un onduleur.

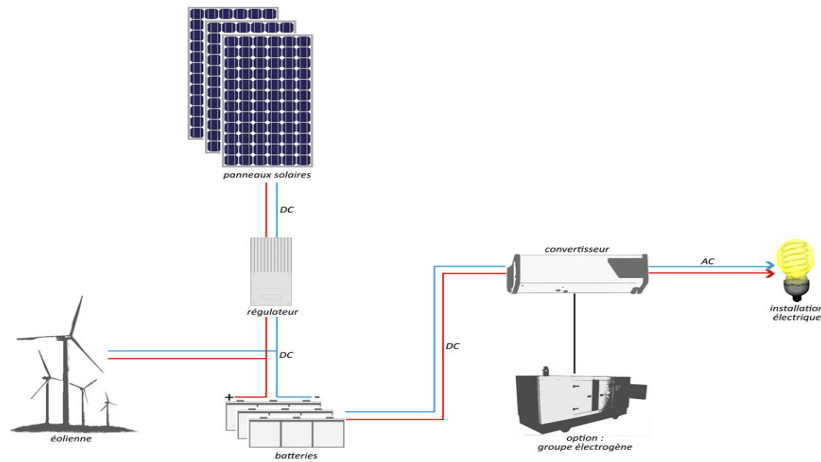


Figure I.1: Schéma synoptique du système hybride étudié.

## I.2. La chaîne de production photovoltaïque

### I.2.1. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ( $0.2 \mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain ( $2.5 \mu\text{m}$ ). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de  $1350 \text{ W/m}^2$  (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (voir la figure I.2).

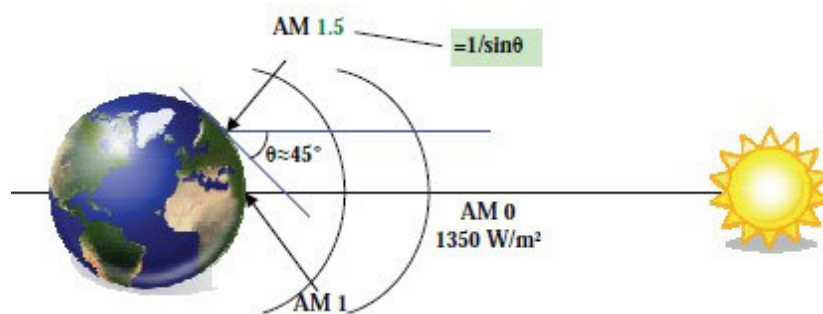
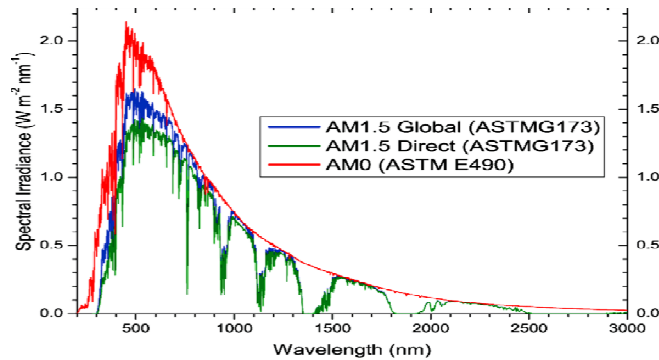


Figure I.2 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à  $90^\circ$  d'inclinaison) atteint  $1000 \text{ W/m}^2$  du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des

rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration  $\theta$  est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente [2].



**Figure I.3 :** Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de  $1000\text{W/m}^2$  (figure I.3) [2].

### I.2.2. Effet photovoltaïque

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation (I.1) [2] :

$$E_{ph} = \frac{h \cdot C}{\lambda_0} \quad (\text{I.1})$$

Où  $E_{ph}$  représente la quantité d'énergie,  $\lambda_0$  la longueur d'onde,  $h$  la constante de Planck et  $C$  la vitesse de la lumière. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

### I.2.3. Principe de la génération photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi conducteurs. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque [3]. Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi conducteurs. Ces deux couches sont dopées différemment. Pour

la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi conducteur (figure I.4). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [4].

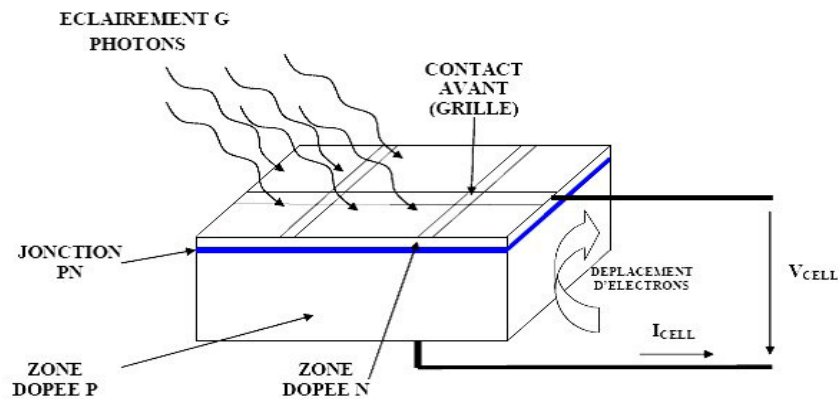


Figure I.4 : Schéma d'une cellule élémentaire.

Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Le rendement énergétique atteint industriellement est de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly-cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces.

Les caractéristiques ainsi obtenues sont celles d'une photodiode mais en convention générateur.

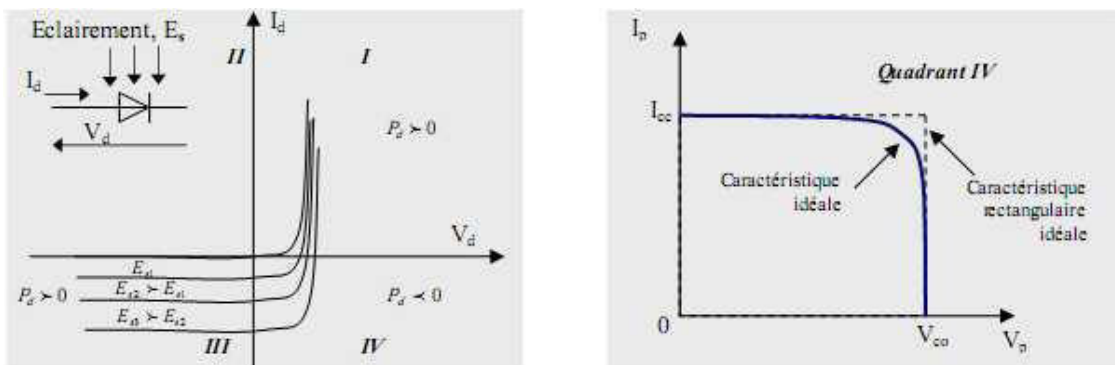
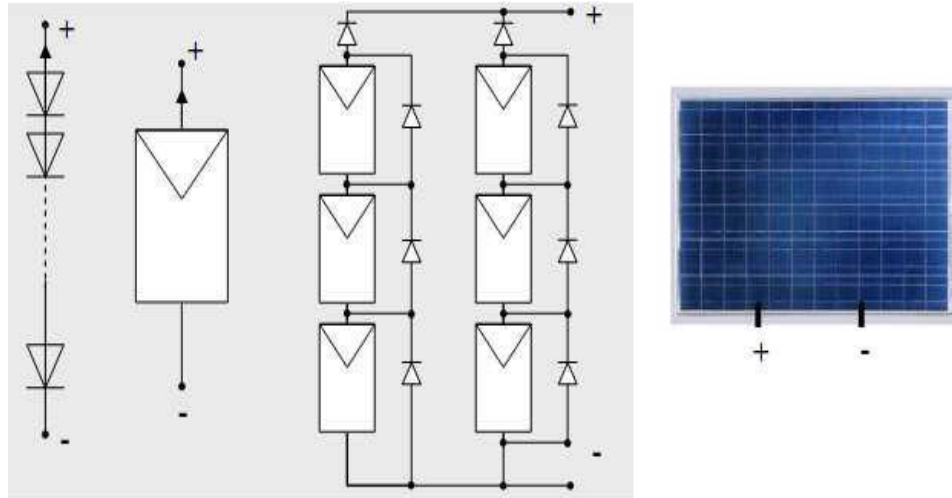


Figure I.5 : A : caractéristique d'une photodiode. B : caractéristique d'une cellule Photovoltaïque [5].

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Alors Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série

et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque (Voir Figure I.6) [6].



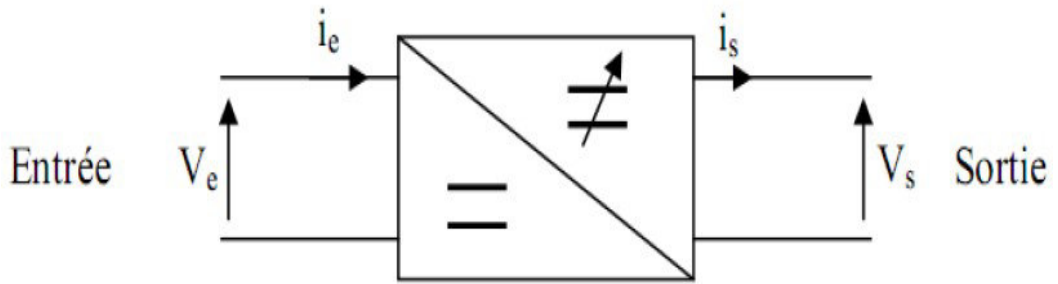
**Figure I.6** : Cellules, module et panneau photovoltaïques.

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

#### I.2.4. Convertisseurs DC/DC [4]

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [7].

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle (figure I.6), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [5].



**Figure I.7 :** Schéma d'un quadripôle électrique.

**Le hacheur** se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

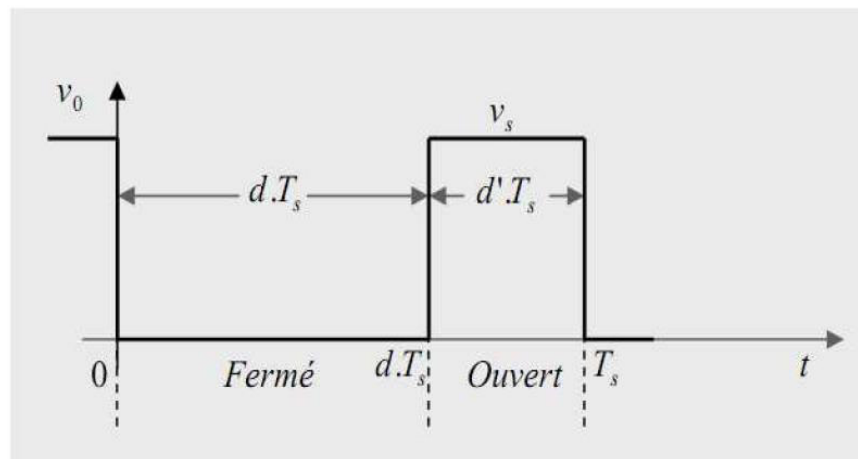
**Le commutateur** est un dispositif semi-conducteur en mode (bloqué -saturé), si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [8].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante  $f_s$

Avec un temps de fermeture =  $d \cdot T$  et un temps d'ouverture =  $(1 - d) \cdot T_s$ , où :

$T$  est la période de commutation qui est égale à  $1/f_s$ .

$d$  le rapport cyclique du commutateur ( $d \in [0,1]$ ) figure (1.7).



**Figure I.8 :** Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

### I.2.5. Convertisseurs DC/DC à pilotage MPPT

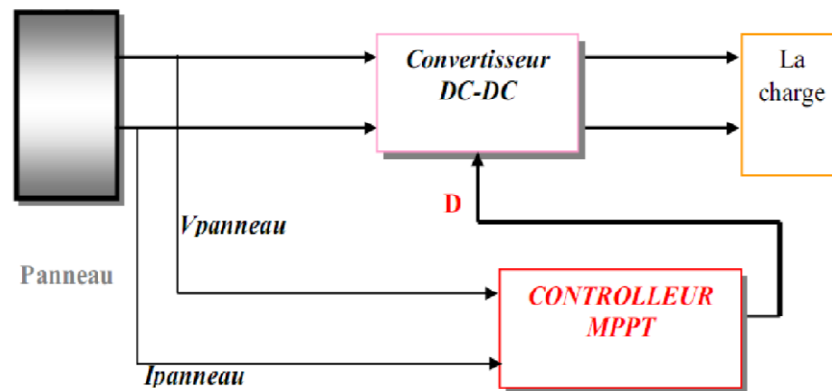
Les panneaux solaires de première génération sont généralement dimensionnés pour que leurs (PPM) correspondent à la tension nominale de batterie de 12 ou 24 Volts. Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit pour effectuer le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module photovoltaïque et sa sensibilité aux conditions

extérieures, comme l'éclairage et la température, induisent des pertes énergétiques. L'utilisation d'un étage d'adaptation afin d'optimiser la production d'énergie à tout moment est ainsi de plus en plus préconisée [11].

### I.2.6. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC

La Figure (1.8), présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie pour stocker de l'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de la tension (ballast,...). Cet étage d'adaptation dispose d'une commande (MPPT) qui permet de rechercher le (PPM) que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche (MPPT) peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

De nombreuses recherches sur les commandes (MPPT) ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche du (PPM) selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Les commandes (MPPT) développées, sont toutes basées sur une commande extrême de type Perturbe & Observe, (P&O) [2].



**Figure I.9** : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (MPPT).

### I.2.7. Les avantages

Les avantages des générateurs photovoltaïques sont plusieurs et leur application se développe d'un moment à l'autre, parmi eux on site [17]:

- une haute fiabilité ou l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- leur montage est simple et ses installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.

- le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits. il ne nécessite ni combustible, ni un transport, ni un personnel hautement spécialisé.
- ils sont recyclables, les matériaux utilisés pour leur production peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire plus de matériaux.
- L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments. Les modules solaires peuvent être en façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la consommation mondiale pendant une année. Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale

### **I.2.8. Les inconvénients**

Malgré les avantages que les générateurs photovoltaïques présentent, des points faibles peuvent se manifester au niveau de fonctionnement et de la fabrication [18] :

- une fabrication d'un module photovoltaïque relève une haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesels.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. la fiabilité et les performances du système.

## **I.3. La chaîne de production éolienne**

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

### **II.3.1. Le Génie Electrique dans le vent**

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [8, 9]. Cette énergie est tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent.

Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 40 ans un essor sans précédent qui est dû notamment aux premiers chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une vingtaine d'années maintient une croissance de 30% par an (voir la figure I.10) [9, 10].



Figure I.10 : Capacité mondiale d'énergie éolienne installée [19].

### I.3.2. Les type d'aérogénérateurs

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice (figure I.10) [12] : les turbines éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical.



A. Eoliennes à axe horizontal

B. Eoliennes à axe vertical

Figure I.11 : Technologies d'éoliennes [13]

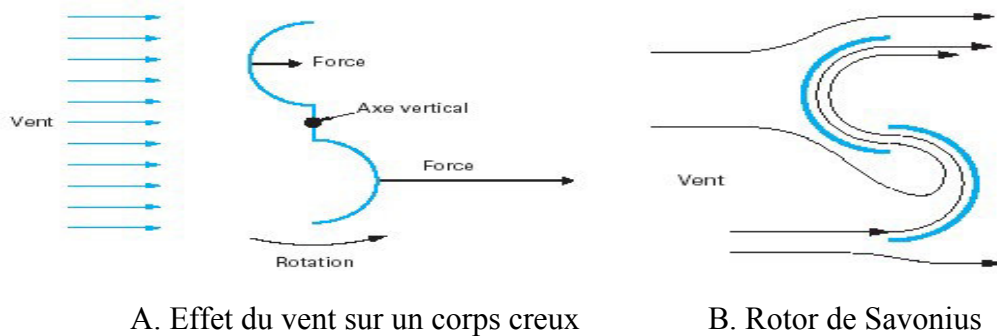
- **Eoliennes à axe vertical**

Deux principes différents sont utilisés pour ce type de machines, à savoir la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.

- **Traînée différentielle**

Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (figure I.11). Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entrainer un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe.

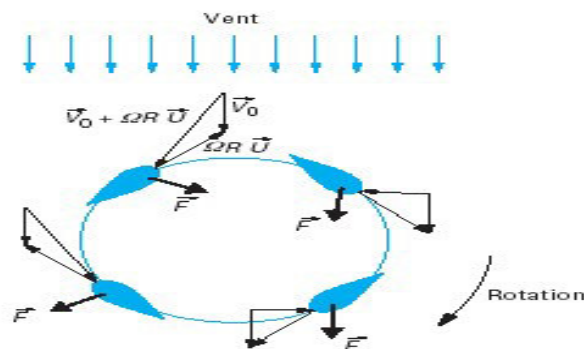
L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est le rotor de Savonius (figure I.11). La circulation de l'air rendue possible entre les deux demi cylindres augmente le couple moteur [14].



**Figure I.12** : Principe de la traînée différentielle.

### ➤ Variation cyclique d'incidence

Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur. En fait les différents angles auxquels sont soumis les profils proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent (figure 1.12) [14].



**Figure I.13** : Principe de la variation cyclique d'incidence.

Avec :

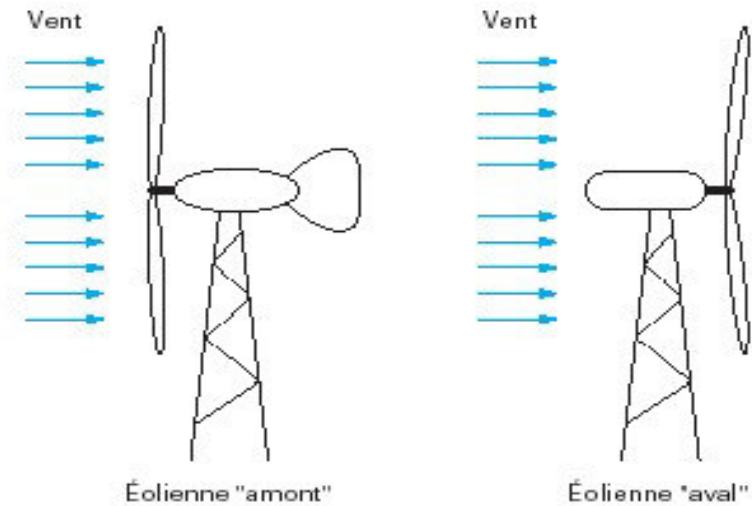
$\vec{V}_0$  : vitesse axiale du vent en amont de l'éolienne.

$\vec{U}$  : vecteur unitaire tangent à la pale.

#### • Eoliennes à axe horizontal

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes ont été remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion. La portance de ces ailes génère un couple moteur destiné à entraîner un dispositif mécanique tel qu'une génératrice électrique, une pompe, etc.

Deux types de configuration peuvent être rencontrés : les éoliennes « amont », sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour exposé au vent, et les éoliennes « aval » (Figure I.13) [14].



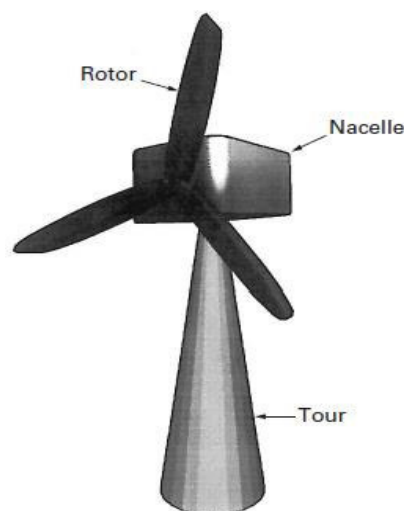
**Figure I.14** : Configurations à axe horizontal : A- éolienne face au vent. B- éolienne sous le vent.

### I.3.3. Choix de technologie de l'éolienne

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important [15].

### I.3.4. Architecture d'une éolienne à axe horizontale

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, (Voir Figure 1.14) [9] :



**Figure 1.15** : Composants d'une éolienne. [9]

#### I.3.4.1. Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales 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 variables, freinage du rotor...) [16, 17].

#### **I.3.4.2. 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.15) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

**I.3.4.3. 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.

**I.3.4.4. 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 [14, 17].

**I.3.4.5. Génératrice** : Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.

**I.3.4.6. 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 [9].

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

**I.3.4.7. 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 [9, 17].

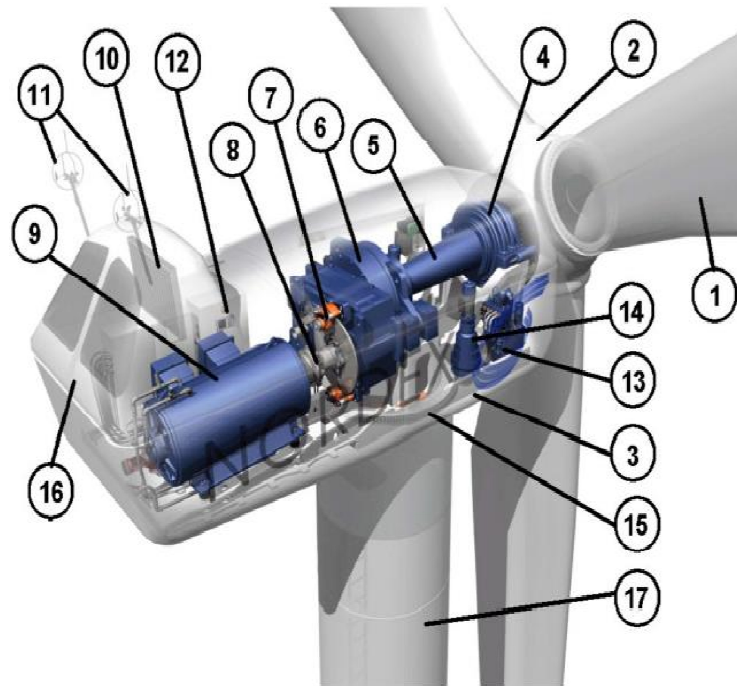


Figure 1.16 : Composition de la nacelle d'une éolienne. [18]

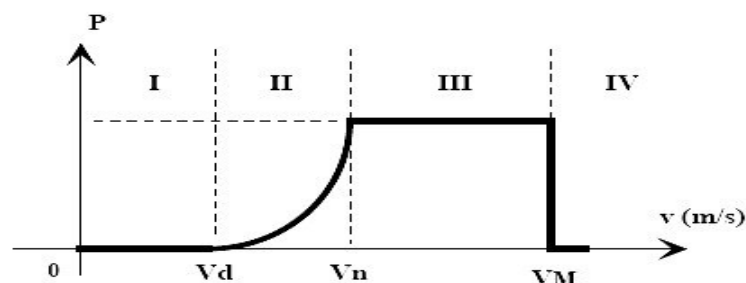
- 1: Pales
- 2: Moyeu
- 3: Structure de la turbine
- 6: Multiplicateur
- 5: Arbre lent
- 4: Paliers du rotor
- 7: Frein a disque
- 8: Accouplement
- 12 : Système de contrôle
- 9: Génératrice
- 14 : Entrainement d'orientation
- 15: Paliers du système d'orientation
- 13 : Système hydraulique 16 : Capot de la nacelle
- 17 : Tour
- 11 : Systèmes de mesure (anémomètre et girouette)

**I. 3.4.8. Tour :** Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour

pour un même ensemble (rotor, nacelle), de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation [9].

### I.3.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale  $P_n$  à partir d'une vitesse de vent nominale  $V_n$ . Pour des vitesses de vents supérieures à  $v_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnées :  $V_d$  la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et  $V_M$  la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement (figure 1.16) [19].



**Figure 1.17 :** Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones [20] :

Dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête la rotation et le transfère la zone I, où  $P_{\text{turbine}} = 0$  (la turbine ne fournit pas de puissance),

- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $V$ ,
- la zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance  $P$  turbine fournie reste sensiblement égale à  $P_n$ ,
- la zone IV, de l'énergie.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

- ✓ système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses [16,17,18].
- ✓ système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une

solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales). Chez certains fabricants de grandes machines, un système hybride se développe, le « stall actif », dans lequel le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minimale des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le système pitch.

D'autres systèmes de régulation, dans les petites éoliennes notamment, sont exploités, basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal, pas variable par la pression du vent (modèle Air wind) : les pales en fibre, se déforment et provoquent un décrochage), déviation par rapport à l'axe du vent. La dérive se trouve légèrement décalée par rapport à l'axe de rotation vertical (qui permet normalement à la turbine d'être face au vent) et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique (la turbine reçoit un vent de travers).

### **I.3.6 Conversion électrique d'énergie éolienne**

#### **I.3.6.1. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne**

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure [22].

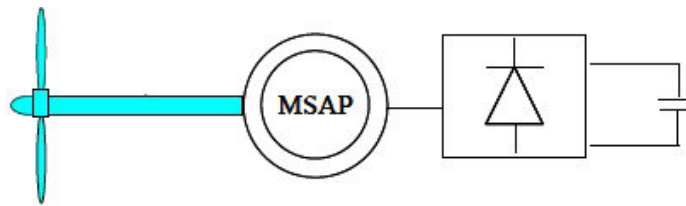
Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses, Mais elles présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants aux dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes [22].

#### **I.3.6.2. Machines synchrones à aimants permanents**

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [23].

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la

suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles [25], La figure (1.18) montre une solution originale et de faible coût pour associer un aérogénérateur à un tel système. La génératrice est de type synchrone à aimants permanents (entraînement direct comme il s'agit de puissances modestes) débitant directement, à travers un pont de diodes triphasé, sur le bus continu et l'accumulateur électrochimique.



**Figure I.18 :** Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu

Le débit direct (à travers un simple redresseur en pont à diodes) de la machine synchrone sur une source de tension continue peut surprendre. En fait, c'est grâce à l'inductance d'induit de la machine synchrone de forte valeur que les courants restent proches des formes sinusoïdales et que les rendements de conversion sont corrects. En cas de surcharge de la batterie (trop de tension), un contacteur met en court-circuit l'induit de la génératrice. La turbine est alors arrêtée en rotation [23].

### I.3.7. Redresseur

Des convertisseurs basés sur des modules entièrement commandés sont coûteux donc pénalisant dans un ensemble de petite puissance. Dans le souci de réduction des coûts, le pont de diodes, peu onéreux, semble attractif à condition que les performances énergétiques ne soient pas trop dégradées.

Dans le cadre de cette étude, on utilise un redresseur à diodes. Les diodes sont supposées idéales et, par conséquent, leur conduction correspond à un court-circuit et leur blocage correspond à un circuit ouvert.

Dans ces conditions, les deux diodes qui conduisent à chaque séquence, correspondent à la phase ayant la tension la plus positive pour la diode du demi-point supérieur et à la phase ayant la tension la plus négative pour la diode du demi-point inférieur. La tension et le courant redressés sont reliés aux tensions et courants de phases. Nous présentons le pont triphasé à diodes alimenté par un système de tensions sinusoïdales triphasées (figure 1.19). Deux diodes d'un même bras ne peuvent pas conduire simultanément. Lorsque  $D_1$  conduit l'une des deux

diodes  $D'_2$  et  $D'_3$  conduit également; il en vient que  $D_1$  conduit lorsque  $V_1$  est supérieur à  $V_2$  et  $V_3$  [24].

Pendant chaque séquence de conduction, la tension  $U_d$  à la sortie de redresseur est :

$$U_c = \max (V_j) - \min (V), \quad j=1, 2, 3 \quad (I.2)$$

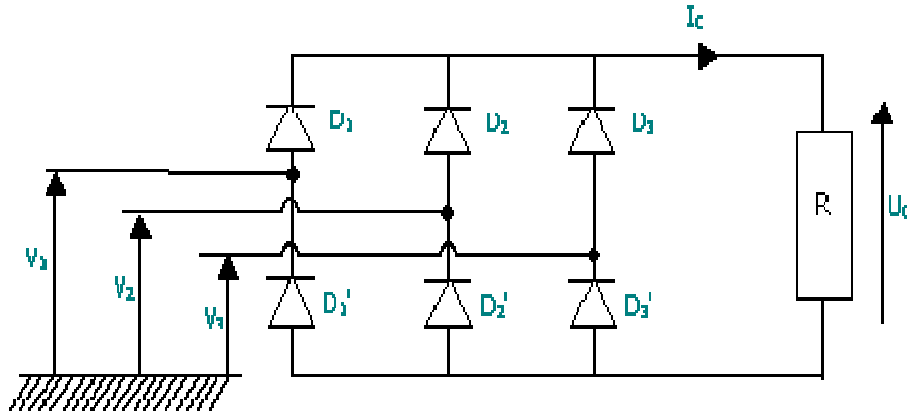


Figure 1.19 : Redresseur à diodes.

### I.3.8. Le dispositif de stockage

#### I.3.8.1. Caractéristiques déterminant le choix d'une technologie de stockage

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est son caractère intermittent. Pour une utilisation permanente, il est donc nécessaire de stocker une partie de l'énergie produite. Pour ce faire il existe plusieurs méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans un volant d'inertie, dans une batterie électrochimique (plomb, lithium) ou un super condensateur. Leur choix se fait suivant des caractéristiques fondamentales qui sont [25]:  $W_{sto}$ : la capacité énergétique en Wh, qui est une caractéristique très importante lors du dimensionnement. L'énergie exploitable dépend néanmoins du rendement de charge ou décharge et varie donc avec le temps de transfert. En charge ou décharge très rapide, le rendement se dégrade et l'énergie extractible peut être très inférieure à la capacité énergétique de l'élément de stockage. A l'opposé, en régime lent, c'est l'autodécharge qui va pénaliser le bilan. Enfin, les accumulateurs ne peuvent pas toujours être déchargés complètement. L'énergie exploitable est donc inférieure à l'énergie totale stockée. Souvent, la capacité énergétique est définie sur la base d'une énergie totale stockée supérieure à celle réellement exploitable notée.

$P_{max}$  : la puissance maximale de charge ou de décharge (parfois différentes).

$\tau$  : la constante de temps, c'est le rapport de la capacité énergétique utile sur la puissance maximale.

$\eta$  : le rendement est le rapport de l'énergie restituée sur l'énergie emmagasinée.

$N_{cyc}$ : le nombre maximal de cycles de charge/décharge ou cyclabilité. Tout dispositif de stockage subit une fatigue ou usure lors des cycles. Cela constitue généralement la première cause de vieillissement devant la dégradation thermique classique.

Les coûts d'investissement (c'est la part la plus marquante pour l'acheteur) et de fonctionnement (maintenance, énergie perdue lors des cycles, vieillissement) : les systèmes les moins coûteux à l'investissement sont généralement ceux qui se dégradent le plus vite en cyclage et dont le rendement est le plus mauvais.

### I.3.9 Moyens de stockage

Les dispositifs de stockage peuvent être classés en deux catégories : directe et indirecte.

Les systèmes directs utilisables sont les super condensateurs et les inductances supraconductrices (SMES) : (Super conductor Magnetic Energy Storage) [25].

Les autres moyens de stockage, considérés comme indirects, sont [25] :

- ✓ les accumulateurs électrochimiques.
- ✓ les accumulateurs à volants d'inertie (FES : Flywheel Energy Storage).
- ✓ les systèmes à air comprimé en bouteilles.
- ✓ les systèmes électrolyseur-hydrogène-pile à combustible (ou a PAC réversible).

Dans les systèmes photovoltaïques, le moyen de stockage utilisé couramment est le stockage électrochimique. De plus, pour un site isolé, il devra respecter certaines contraintes notamment un bon rapport coût / performance, une grande fiabilité, une bonne sécurité... Dans ce domaine, les batteries au plomb-acide sont les plus répandues car elles offrent le meilleur compromis en termes de coût / performance / entretien. Nous présenterons une étude sur le fonctionnement de ces batteries et les précautions à prendre pour leur bon fonctionnement [26].

### I.3.9. Fonctionnement d'un accumulateur au plomb

Un accumulateur est un système électrochimique capable de restituer sous forme électrique l'énergie chimique stockée. En plus, les réactions internes sont réversibles. Ce système se compose de deux électrodes (positive et négative) et d'un électrolyte (voir figure I.19). L'électrode positive est en dioxyde de plomb ( $PbO_2$ ) et la négative en plomb. L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) qui permet le flux d'ions entre les deux électrodes et crée un courant [27]. La différence de potentiel entre les deux électrodes est de 2V.

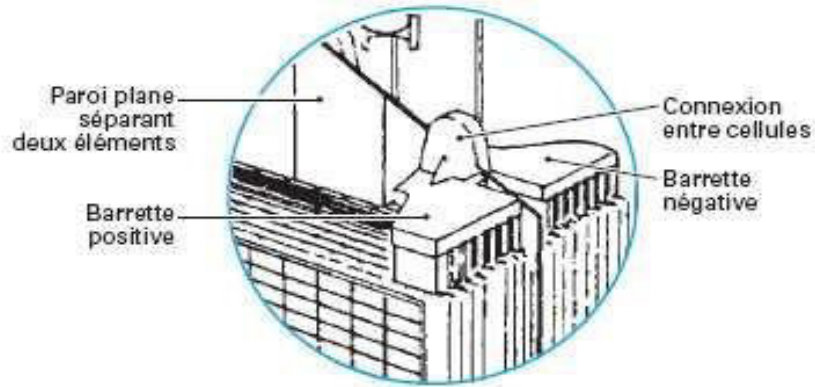
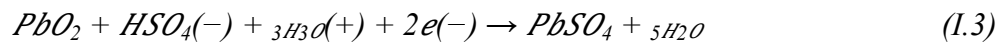


Figure I.20 : Représentation interne de l'accumulateur [28].

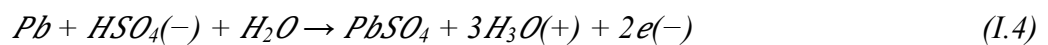
La paroi plane séparant les deux électrodes est fait d'un matériau poreux qui, tout en permettant le passage d'ions, empêche les deux électrodes de se toucher [26].

L'ensemble électrodes-électrolyte est le lieu d'une réaction d'oxydoréduction dont voici les équations [26] :

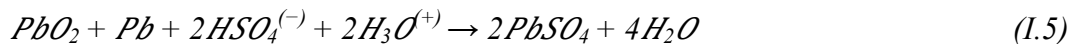
Electrode positive (anode) :



Electrode négative (cathode) :



Ce qui nous donne globalement :



Que l'on peut condenser en :



Les décharges trop profondes peuvent conduire à une perte irréversible de capacité. Trois causes possibles sont à l'origine de ce phénomène [26] :

Transformation irréversible d'une partie de la matière active de l'électrode positive en cristaux de sulfate de plomb, gonflement progressif et perte de cohésion de la matière active de l'électrode positive, passivation électronique du collecteur de courant de l'électrode positive.

Typiquement, la tension de cellule évolue de la manière suivante (figure I.20):

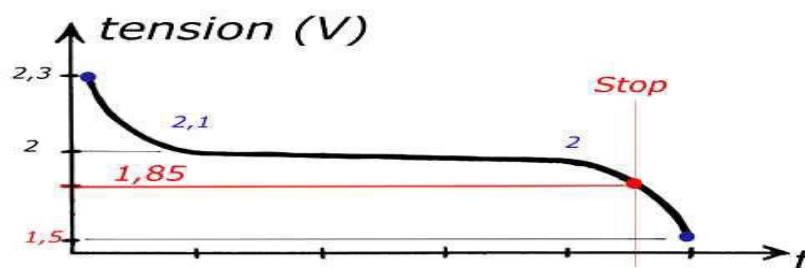


Figure I.21 : Evolution de la tension d'une cellule de batterie au plomb

Si la charge se poursuit trop longtemps, la tension peut atteindre 2,4 V, valeur de seuil à partir de laquelle on assiste à la décomposition de l'eau (électrolyse) en dioxygène  $O_2$  gazeux à l'électrode positive et en dihydrogène  $H_2$  gazeux à l'électrode négative [26].

Ce phénomène dit de dégazage est caractérisé par les réactions suivantes aux électrodes [26] :  
à l'anode :



à la cathode :



réaction globale :



La densité théorique d'énergie de ce couple électrochimique est de 170 Wh/kg. Cependant, le sulfate de plomb produit par les réactions aux deux électrodes est insoluble et non conducteur. Son accumulation sur les électrodes, et dans une moindre mesure dans l'électrolyte, limite par conséquent l'énergie qui peut être extraite de la batterie. De plus, les concentrations et les quantités de masses actives sont inférieures à celles conduisant à cette valeur. La densité pratique d'énergie est proche de 40 Wh/kg, soit quatre fois moins que le maximum théorique [26].

### I.3.10. Bus à courant continu

L'éolienne et les panneaux PV sont connectés à un bus continu. Pour un fonctionnement optimal, ceux-ci ont besoin d'une tension constante sur ce bus [1].

La régulation de la tension continue  $V_{dc}$  sur le bus CC est mise en œuvre par un hacheur réversible en courant, connecté à un banc de batteries. Ainsi, le bus à CC est régulé à une valeur de tension constante en contrôlant le flux d'énergie entre les batteries et le bus. Quand l'énergie fournie par les sources d'énergie renouvelable est insuffisante pour faire face à une augmentation soudaine de la charge, la tension du bus à CC devient inférieure à la valeur de référence. Dans ce cas, l'énergie manquante est obtenue à partir des batteries. Quand il existe un excès d'énergie, il est utilisé pour recharger les batteries. L'architecture de ce système est présentée dans la (figure 1.21) [1].

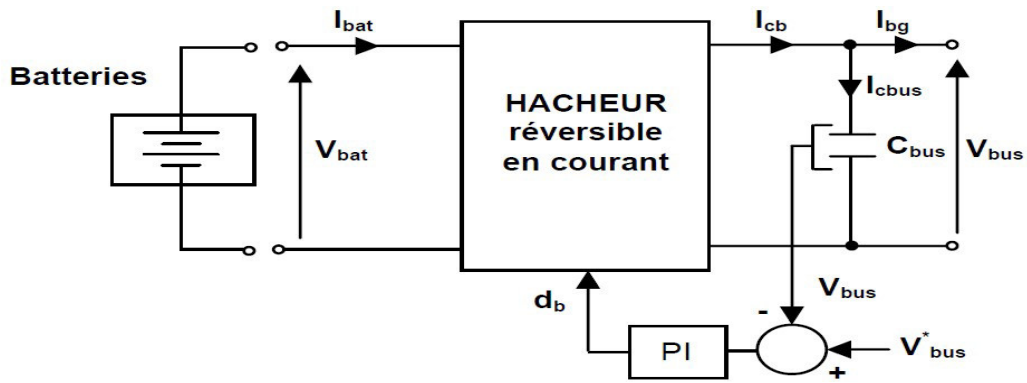


Figure I.22 : Architecture du bus à CC avec batteries de stockage.

**I.3.11. Hacheur réversible en courant**

Dans le cas du hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur PV, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens, de la source (générateur PV) vers le bus à CC. Dans le cas du Hacheur utilisé par la charge / décharge des batteries, le courant électrique doit être réversible.

Ainsi, pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur ont été associés comme l'indique la figure (1.22) [1].

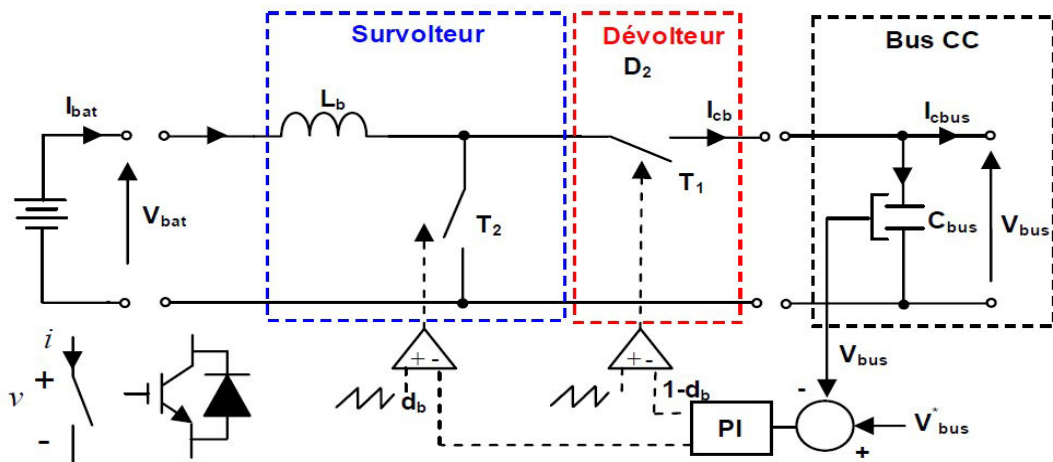


Figure I.23 : Hacheur réversible en courant.

**I.3.12. Onduleur**

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée [29].

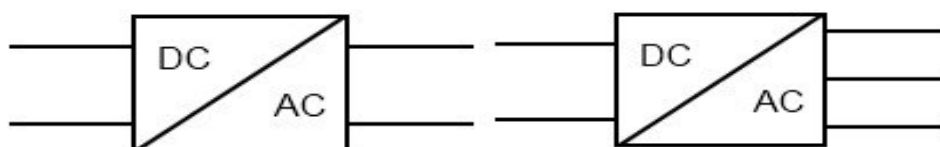


Figure I.24 : Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé.

### I.3.14. Structure d'onduleur

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs (figure I.25). Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue. Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant, et se compose soit d'un MOSFET et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle [30].

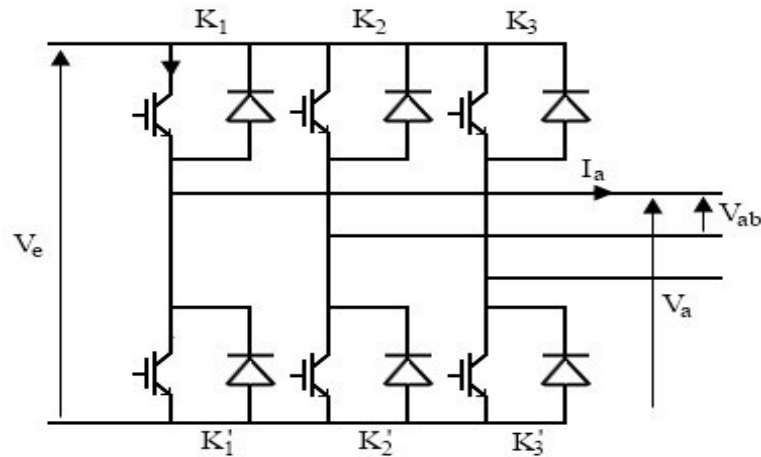


Figure I.25 : Structure d'un onduleur triphasée.

### I. 3.15. Classification des onduleurs

Les onduleurs sont classés selon le mode de commutation : les onduleurs autonomes qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée [18].

les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre [18].

Ou selon la nature de la source continue :

**Onduleur de tension** : la source DC impose la tension, la charge AC impose le courant sinusoïdal [18].

**Onduleur de courant** : la source DC impose le courant, la charge AC impose la tension sinusoïdale [18].

## I.4. Le générateur diesel

Dans les sociétés actuelle, toutes les activités, qu'elles soient professionnelles ou privée, sont consommatrices d'énergie électrique. La production de cette énergie dans les sites isolés est fournie par un générateur Diesel, ce dernier est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité. La plupart des générateurs sont constitués d'un moteur thermique qui actionne

un alternateur. Leur taille et poids peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes.

#### I.4.1. Description

Le générateur diesel se compose principalement d'un :

##### ❖ Moteur diesel

Les moteurs diesel ont pour rôle de transformer l'énergie thermique à l'énergie mécanique.

##### ❖ L'alternateur

Un alternateur est une machine électrique tournante fonctionne en mode génératrice. Il convertit une puissance mécanique, qu'il absorbe sous forme (c,w) en une puissance électrique. Il est à la base de presque toute la production d'énergie électrique mondiale grâce à son excellent rendement.



Figure I.26 : Le Générateur Diesel [6]

#### I.4.2. Les caractéristiques de générateur diesel

##### ❖ Le moteur diesel

La puissance de moteur : la puissance effective est le travail moteur fourni en un (b) seconde.

Pour un nombre de tours donnés (N) le travail sera :

$$W = C * 2\pi * N \quad [W = Nm * S^{-1}] \quad (I.10)$$

C : le moment du couple moteur.

Soit pour N tours par minute :

$$P = \frac{W}{T} = C * \frac{2\pi N}{60} = C * \omega \quad (I.11)$$

Ou  $\omega$  : la vitesse angulaire

##### ❖ L'alternateur

La puissance utile développée par l'alternateur :

En monophasé :

$$P_U = V * I * \cos \phi \quad (kw) \quad (I.12)$$

En triphasé :

$$PU = U * I * \sqrt{3} * \cos \phi \quad (\text{kw}) \quad (\text{I.13})$$

Avec :

U : tension entre deux bornes de phase

V : tension entre la phase et le neutre

cos  $\phi$  : Facteur de puissance

### I.4.3. Gestion correspondant au générateur Diesel

Le cout d'exploitation d'un générateur Diesel dépende de sa consommation en fuel, tandis que le cout de maintenance est fortement lié au nombre d'heures d'utilisation et au régime de fonctionnement. Il faut noter que les démarrage fréquents du groupe diesel accélèrent l'usure du moteur et par conséquent réduisent sa durée de vie.

Pour minimiser les couts d'exploitation et de maintenance, le système de commande de générateur diesel devra agir en respectant les prescriptions suivantes :

- Une fois le moteur en marche, celui-ci devra fonctionner pendant une période de temps minimale. Cette période ne peut être inférieure à 15 minutes de marche. Cette condition a été introduit dans l'objectif de réduire l'usure du moteur et de minimiser l'intervention pour la maintenance.
- Le générateur diesel ne doit pas fonctionner à faible régime durant une période prolongée.

Un générateur diesel de taille moyenne se caractérisé par un rendement énergétique de l'ordre de 3,5 KWH /Litre quand le moteur tourne au dessus de 80% de sa capacité nominale. Le fonctionnement du moteur Diesel du moteur diesel à faible puissance de sortie réduit son rendement énergétique. Cette spécificité montre un accroissement brusque du cout du fuel lorsque la charge du générateur Diesel tombe en dessous de 40% de la puissance nominale.

### I.4.4 Les avantages et les inconvénients

#### a) Avantages

- Conception et exploitation peu complexe
- Option familière et technologie mure
- Système très économique quand le fuel est disponible à bas prix
- Faible si l'entretien est assuré par des techniciens bien formés

#### a) Inconvénients

- Cout du KWH fortement lié au cout de fuel.
- Cout de maintenance des générateurs diesel élevés.
- Faible rendement et usure prématurée à charge partielle.
- Système non flexible face à une variation.
- de la charge.

- Emission de gaz, de fumée et de bruit.

## CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes éoliens et les systèmes solaires aussi on a déjà parlé sur le générateur diesel et sons descriptions avec ces avantages et inconvénients.

La première partie et après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur principe de fonctionnement ont été décrits. La seconde partie du chapitre a été consacrée aux systèmes solaires et plus précisément ceux d'origines photovoltaïques et le diesel convertir l'énergie thermique en énergie mécanique puis électrique.

## **CHAPITRE II**

# **MODELISATION DES COMPOSANTS D'UN SYSTEME HYBRIDE**

---

## INTRODUCTION

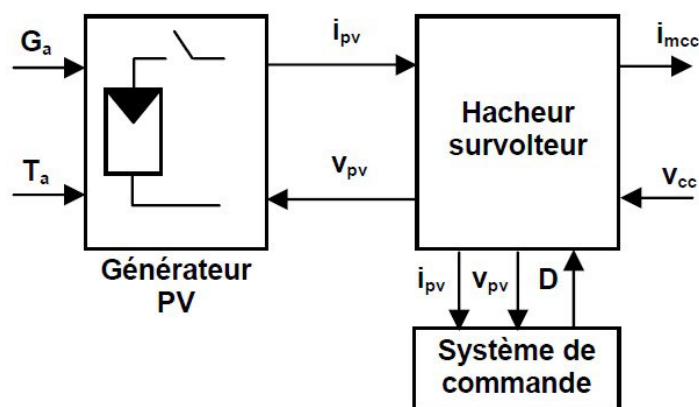
Après avoir étudié et cité les différents composants du système éolien-photovoltaïque-Diesel, aussi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à la modélisation du système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (données de base) c'est-à-dire les données météorologiques au site, et les données relatives aux équipements. De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système.

Dans ce chapitre, nous représenterons le modèle des données : rayonnement solaire sur un plan incliné, de vitesse de vent et de température. Nous exposons des modèles de générateur photovoltaïque, de l'éolienne, d'éléments de conversion et du dispositif de stockage (batterie).

### II.1. Modélisation de la chaîne photovoltaïque

La chaîne de conversion photovoltaïque, constituée d'un générateur PV et l'ensemble : hacheur survolteur et son système de commande, permettant d'extraire la puissance maximale. Cette chaîne est représentée en figure (II.1) La modélisation de ses différents organes va être examinée dans ce qui suit, en commençant par le rayonnement solaire.



**Figure II.1 :**Chaîne de conversion photovoltaïque.

#### II.2.1. Modélisation du rayonnement solaire

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

**II.2.1.1. Coordonnées géographiques terrestres**

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre : la latitude et de la longitude du lieu.

- **La latitude ( $\varphi$ )** : c'est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré et le centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif.
- **La longitude (L)** : c'est l'angle formé par le plan méridien origine de Greenwich et le plan méridien du lieu considéré. Les longitudes situées à l'Est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest sont négatives.

**II.2.1.2. Position du soleil**

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux référentiels différents, grâce à deux plans, plan horizontal du lieu et le plan équatorial de la terre.

**II.2.1.2. 1. Coordonnées équatoriales**

Dans ce référentiel le soleil est localisé au moyen de deux angles, la déclinaison solaire  $\delta$  et l'angle horaire  $\omega$ .

- **La déclinaison**

C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. Sa valeur varie entre  $-23.45^\circ$  (Au solstice d'hiver) et  $+23.45^\circ$  (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne. Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du soleil par une rotation sur cône d'axe l'équateur, en fonction du jour de l'année [27].

$$\delta = 23.45 \sin \left( 2\pi \frac{284+N}{365} \right) \quad (\text{I.5})$$

$N$  est le nombre de jour de l'année compté à partir du 1<sup>er</sup> janvier.

- **L'angle horaire**

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  $15^\circ$  par heure (un tour de  $360^\circ$  en 24 heures). Ainsi, à 7 h 00 du matin (heure solaire), l'angle horaire du soleil vaut  $-75^\circ$  (7 h 00 du matin est 5 h avant midi; cinq fois  $15^\circ$  égal  $75^\circ$ , avec un signe négatif puisque c'est le matin) [33].

$$\omega = 15(T_{sv} - 12) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$T_{sv} = T - \Delta GMT + \frac{L}{15} + \frac{ET}{60} \quad (II.3)$$

$$E_T = 9.87 \sin 2B_j - 7.53 \cos B_j - 1.5 B_j \quad (II.4)$$

$$B_j = 2\pi \frac{(N-81)}{365} \quad (II.5)$$

$\Delta GMT$  : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich

$T_{sv}$  : temps solaire vrai

$T_L$  : temps légal (donnée par une montre)

$E_T$  : l'équation de correction du temps

$L$  : longitude du lieu

L'angle horaire  $\omega$  varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ , prend la valeur nulle à midi  $T_{sv}$ , négative durant la période avant midi  $T_{sv}$  et positive après.

L'angle horaire du soleil à son coucher  $\omega_s$  est calculé à partir l'équation (2.3) [26].

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (II.6)$$

#### II.2.1.2.2. Coordonnées horizontales

Le soleil est repéré par rapport au plan horizontal du lieu de latitude  $\varphi$ , par deux angles, la hauteur  $\gamma$  et azimut du soleil.

- **Hauteur du soleil**

La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu. La hauteur évolue à chaque instant de la journée selon l'expression suivante [29]:

$$\sin \gamma = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (II.7)$$

Les valeurs de la hauteur  $h$  varie entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$ ,  $\gamma$  prend la valeur nulle au lever et au coucher du soleil, positive le jour et négative la nuit.

- **Azimut du soleil**

Azimut du soleil est défini par l'angle que fait la projection de la direction du rayonnement solaire avec la direction sud du lieu [34]:

$$\cos \psi = \sin \gamma \sin \varphi - \frac{\sin \delta}{\cos \gamma \sin \varphi} \quad (II.8)$$

L'azimut oscille entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ , l'angle prend les valeurs positives vers l'ouest, négatives vers l'est et nulle en direction sud.

- **Angle zénithale**

La distance zénithale ou angle zénithal, c'est l'angle que fait la direction du soleil avec la vertical du lieu :

$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi) \quad (\text{II.9})$$

**II.2.1.3. L’angle d’incidence du rayonnement direct sur un plan incliné**

L’angle d’incidence  $\theta$  est l’angle formé entre la direction du soleil et la normal à la surface inclinée du capteur. L’angle d’incidence  $\theta$  a un effet primordial et une incidence directe sur la quantité d’enseillement reçue sur la surface collectrice. Cet angle peut être déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayonnement incident et la normale du plan incliné en coordonnées horizontale du lieu, cet angle dépend des paramètres de la position du soleil et de l’angle d’inclinaison du capteur. Il est défini par [27]:

$$\theta = \cos^{-1}[\sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma_s + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma_s \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma_s] \quad (\text{II.10})$$

Les angles  $\beta, \gamma_s$  sont respectivement l’angle d’inclinaison du capteur et l’angle entre la direction de la surface du capteur et plein sud.

**II.2.1.4. Calcul de rayonnement solaire horaire sur un plan incliné**

A l’aide du logiciel nous avons téléchargé de la NASA, des données quotidiennes de rayonnement solaire sur un plan horizontal  $H$ . Il est nécessaire d’estimer les valeurs horaires du rayonnement solaire sur un plan incliné  $G_\beta$ .

En 1960, Liu et Jordan ont proposé un modèle empirique simple qui permet d’estimer les composantes du rayonnement solaire sur plan incliné ne nécessitant que quelques paramètres géo astronomiques tels que le numéro de jour de l’année, la hauteur du soleil et la latitude du lieu. L’avantage de ce modèle par rapport aux autres est qu’il permet de générer le flux solaire reçu au sol pour différents états du ciel et différentes inclinaisons de surfaces [35].

Le rayonnement globale horaire sur une surface de plan incliné d’un angle  $\beta$ ,  $G_\beta$  est la somme de trois composantes de rayonnement horaires : directe, diffus et réfléchi [36].

$$G_\beta = G_{b_\beta} + G_{d_\beta} + G_{r_\beta} \quad (\text{II.11})$$

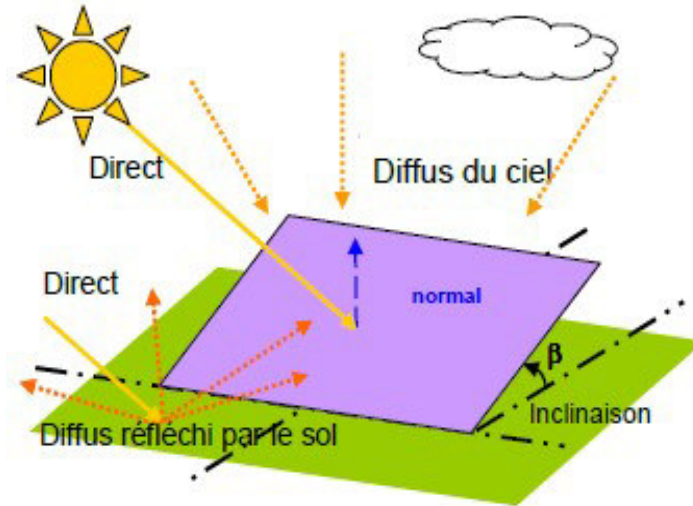


Figure II.2 : Radiation solaire globale sur un plan incliné [27]

$$G_{b_\beta} = G_b \cdot \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (\text{II.12})$$

$$G_{d_\beta} = G_d \cdot \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) \quad (\text{II.13})$$

$$G_{r_\beta} = G \cdot \rho \cdot \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (\text{II.14})$$

Alors

$$G_\beta = G_b \cdot \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} + G_d \cdot \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + G \cdot \rho \cdot \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (\text{II.15})$$

Où :

$\rho$ : le coefficient de réflexion de lumière diffuse du sol (aussi appelé albédo du sol),  $\theta$ : l'angle d'incidence de l'ensoleillement direct,  $\theta_z$ : l'angle zénithal du soleil,  $G$ : l'ensoleillement global horizontal,  $G_b$  l'ensoleillement horizontal directe,  $G_d$  l'ensoleillement horizontal diffus.

Avec, Pour chaque heure de la journée,  $G$  et  $G_d$  sont calculés à partir des valeurs quotidiennes  $H$  et  $H_d$ .

$$G_d = r_d \cdot H_d \quad (\text{II.16})$$

$$G = r_T \cdot H \quad (\text{II.17})$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{(\cos\omega - \cos\omega_s)}{\sin\omega_s - \omega_s \cos\omega_s} \quad (\text{II.18})$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{(\cos\omega - \cos\omega_s)}{\sin\omega_s - \omega_s \cos\omega_s} \quad (\text{II.19})$$

$$r_T = \frac{\pi}{24} (a + b \cos\omega) \frac{(\cos\omega - \cos\omega_s)}{\sin\omega_s - \omega_s \cos\omega_s} \quad (\text{II.20})$$

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin\left(\omega_s - \frac{\pi}{3}\right) \quad (\text{II.21})$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin\left(\omega_s - \frac{\pi}{3}\right) \quad (\text{II.22})$$

$\omega$  : l'angle horaire du soleil,  $\omega_s$ : l'angle horaire du soleil à son coucher .

Le rayonnement diffus quotidien  $H_d$  est calculé à partir du rayonnement globale quotidien  $H$  à l'aide de la corrélation de Beckman. D'abord, on calcule l'indice de clarté  $K_T$  du jour. Ce dernier est donné par [36] :

$$K_T = \frac{H}{H_0} \tag{II.23}$$

Où :  $H_0$  est le rayonnement solaire extraterrestre, donné par l'équation (2.15) [5 Bec] :

$$H_0 = \frac{24}{\pi} H_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360N}{365} \right) \cdot \left( \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \tag{II.24}$$

Avec :  $H_{sc} = 1,367 \text{ Kw/m}^2$

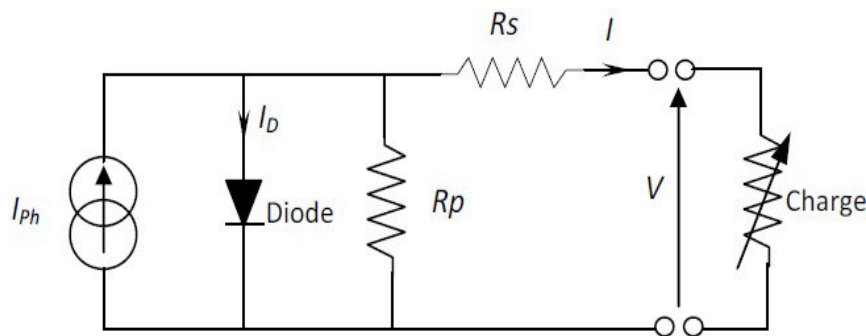
Après avoir trouvé l'indice de clarté du jour, on peut calculer le rayonnement diffus quotidien  $H_d$ .

Le rapport  $\frac{H_d}{H}$  est donné par les équations (2.16, 2.17, 2.18, 2.19) [36].

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0,143 & \text{si } K_t \geq 0,715 \\ 9,3879 K_t^4 & \text{si } K_t < 0,715 \\ 0,175 & \text{si } K_t < 0,722 \end{cases} \tag{II.25}$$

**II.2.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque**

Une cellule PV (figure II.3) fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes. Les résistances  $R_s$  et  $R_p$  permettent de tenir compte des pertes liées aux défauts de fabrication ;  $R_s$  représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que  $R_p$  caractérise les courants de fuite dus à la diode et aux effets de bord de la jonction [38].



**Figure II.3 :** Schéma électrique équivalent d'une cellule PV, modèle à une diode

La loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante

$$I_{p\Box} = I_d + I_p + I \tag{II.26}$$

A partir de ce circuit, on tire les équations qui nous permettent d'obtenir la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque.

Le courant de jonction  $I_d$  est donné par :

$$I_d = I_{sat} \left( \exp \left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot T_c} \right) - 1 \right) \quad (II.27)$$

Le courant dans la résistance  $R_p$  est donné par :

$$I_p = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (II.28)$$

on obtient l'expression de la caractéristique I-V du modèle choisi [5] :

$$I = I_{p\Box} - I_d = I_{sat} \left( \exp \left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot T_c} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (II.29)$$

Avec :

$I_{sat}$  : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A),

$n$  : Coefficient d'idéalité de la cellule photovoltaïque  $k$  : Constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K)

$q$  : Charge d'électron

$T_c$  : Température absolue de la cellule (K)

La température de la cellule est donnée par l'équation suivante :

$$T_c = T_a + (N_{oct} - T_{aN_{oct}}) \frac{G}{G_{N_{oct}}} \quad (II.30)$$

$T_a$  : Température ambiante,

$N_{oct}$  : Température nominale de fonctionnement de cellules,

$T_{aN_{oct}}$  : Température ambiante à  $N_{oct}$ ,

$G$  : Rayonnement solaire,

$G_{N_{oct}}$  : Rayonnement solaire à  $N_{oct}$ .

Le photo-courant  $I_{ph}$  est donné par :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} I_{cc\_ref} [1 + \alpha_{icc} (T_c - T_{ref})] \quad (II.31)$$

Avec:

$I_{cc\_ref}$  : Courant de court-circuit de référence,

$\alpha_{icc}$  : Coefficient de température du courant de court-circuit,

Le courant de saturation peut être calculé à partir de l'équation :

$$I_{sat} = \left( \frac{I_{ph}}{\exp \left( \frac{V_{co}}{n \cdot V_T} \right) - 1} \right) \quad (II.32)$$

Avec,  $V_{co}$ : tension de circuit ouvert.

$V_T$  : Le potentiel thermodynamique, est égale a 25mv à 20°C [39].

La résistance parallèle  $R_p$  a une valeur assez élevée. Alors le courant généré par la cellule peut être donné sous la forme :

$$I = I_{ph} \left[ 1 - \frac{\left( \exp\left(\frac{V+I.R_s}{n.V_t}\right) - 1 \right)}{\left( \exp\left(\frac{V_{co}}{n.V_t}\right) - 1 \right)} \right] \quad (II.33)$$

### II.2.2.1. Paramètres d'une cellule PV

#### II.2.2.1.1. Le courant de court circuit

Le courant de court-circuit  $I_{cc} \approx I_{ph}$ , c'est la plus grande valeur du courant générée par la cellule sous les conditions du court-circuit où  $V=0$  [6].

La variation du courant de court-circuit en fonction de l'éclairement et de la température de jonction et par rapport aux conditions standards est la suivante [34]

$$I_{CC} = \frac{G}{G_{ref}} I_{cc\_ref} [1 + \alpha_{icc} (T_c + T_{ref})] \quad (II.34)$$

#### II.2.2.1.2. La tension de circuit ouvert

La tension de circuit ouvert est la tension à travers la jonction/diode PN où  $I = 0$ . Elle représente la tension de cellule lorsqu'elle est à l'ombre. Elle est donnée par [40] :

$$V = V_{co} = n.V_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}}\right) \quad (II.35)$$

La variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'éclairement et de la température de jonction et par rapport aux conditions standards est la suivante [6] :

$$V_{co} = V_{co\_ref} + \alpha_{vco} (T_c - T_{ref}) + n.V_T \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \quad (II.36)$$

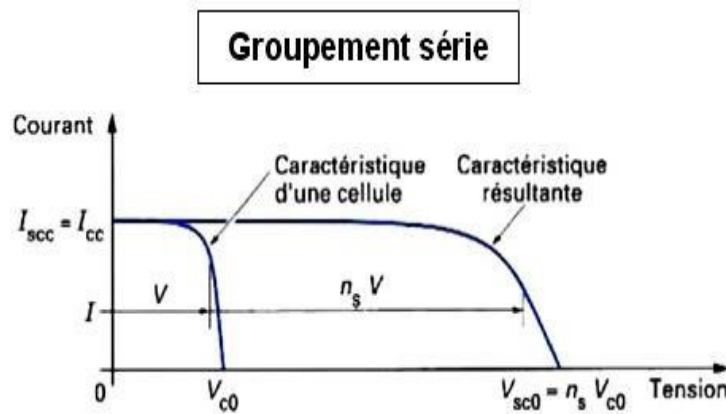
**Avec :**

$\alpha_{vco}$ : Coefficient de température de tension de circuit ouvert.

#### II.2.2.2. Association de Cellules Photovoltaïques

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné [4].

La figure 2.4 montre la caractéristique résultante courant-tension ( $I_{sc}, V_{sc}$ ) obtenue en associant en série  $n_s$  cellules identiques dont la caractéristique courant-tension est ( $I_{cc}, V_{co}$ ) [4]:

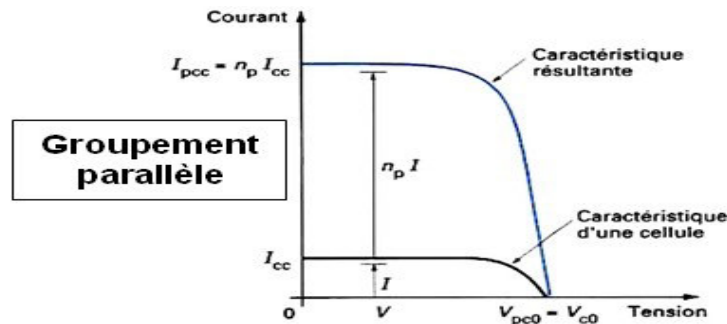


$$V_{sco} = n_s V_{co} \quad I_{scc} = I_{cc}$$

Figure II.4 Caractéristiques de cellules photovoltaïques en série

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [4].

La figure II.5 montre la caractéristique résultante ( $I_{pcc,o}$ ) obtenue en associant en parallèle  $n_p$  cellules identiques ( $I_{cc}, V_{co}$ ) [4]:



$$V_{pco} = V_{co} \quad I_{pcc} = n_p I_{cc}$$

Figure II.5 Caractéristiques de cellules photovoltaïques en parallèle

### II.2.2.3. Modélisation du générateur PV

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle. Un groupe de panneaux PV de  $n_s$  cellules montées en série et  $n_p$  cellules en parallèle est modélisé par le schéma de la figure 2.6 [19].

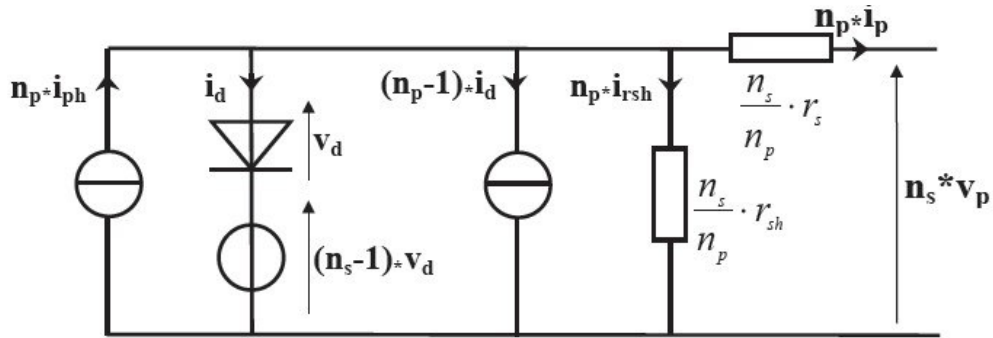


Figure II.6 : Schéma électrique équivalent d'un générateur PV, modèle à une diode

$$\begin{aligned}
 I_{ph} &= n_p \cdot i_{ph} & I_G &= n_p \cdot i_{pph} \\
 I_d &= n_p \cdot i_d & I_{rsh} &= n_p \cdot i_{rsh} \\
 V_d &= n_s \cdot v_d & V_G &= n_s \cdot v_p \\
 R_s &= \frac{n_s}{n_p} \cdot r_s & & (II. 37)
 \end{aligned}$$

II.2.2.3.1. Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série et en série parallèle donne ce qu'on appelle le générateur photovoltaïque dont la caractéristique générale est représentée sur la figure (figure II.7).

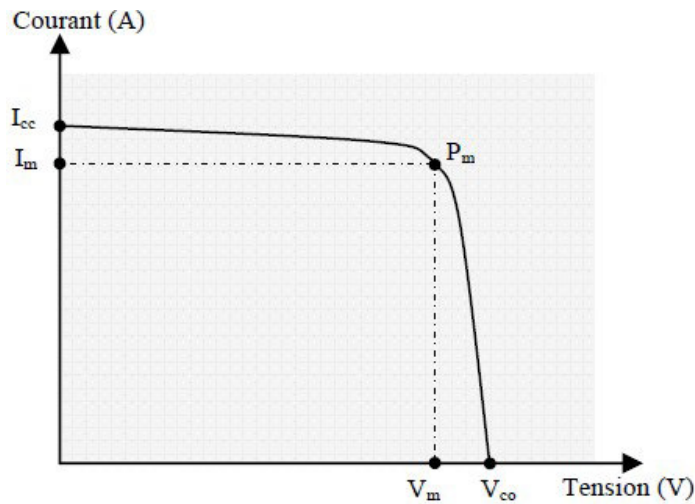


Figure II.7 : Caractéristique courant- tension d'un générateur photovoltaïque.

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert,

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit,

$V_m, I_m$  : Tension et courant au point de puissance maximale  $P_m$ .

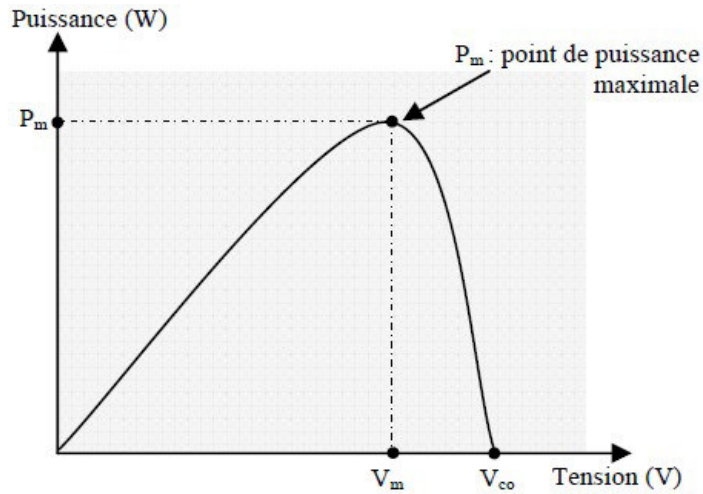
II.2.2.3.2. Caractéristique P-V d'ungénérateur photovoltaïque

La puissance générée par une cellule photovoltaïque est donnée par

$$P = V \cdot I \tag{II.38}$$

La puissance maximale est obtenue lorsque :

$$\frac{dP}{dv} = 0 \quad (II.39)$$



**Figure II.8 :**Caractéristique puissance- tension d’un générateur photovoltaïque.

**II.2.2.3.3. Rendement d’un générateur photovoltaïque**

Le rendement d’une cellule est le rapport entre la puissance maximale disponible et la puissance du rayonnement incident, il est donné par :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{A \cdot G_a} \quad (II.40)$$

$P_{in}$ : Puissance incidente sur la surface de la cellule photovoltaïque (W)

$G_a$  : Eclairement global incident sur la cellule photovoltaïque (W/m<sup>2</sup>),  $A$ : Surface totale de la cellule photovoltaïque (m<sup>2</sup>).

**II.2.2.3.4. Facteur de forme**

Il permet de juger de la qualité d’une cellule photovoltaïque. Il est défini comme le rapport entre le point de puissance maximum et la puissance à courant de court-circuit et tension en circuit ouvert.

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{I_m \cdot V_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{\eta \cdot A \cdot G_a}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (II.41)$$

A partir de cette définition, pour une cellule dont la caractéristique I-V est rectangulaire (source de courant),(figure II.9), le facteur de forme sera donc unitaire. Le facteur de forme d’une bonne cellule photovoltaïque devra être compris entre 0,75 et 0,85. Le facteur de forme FF diminue si la température augmente.

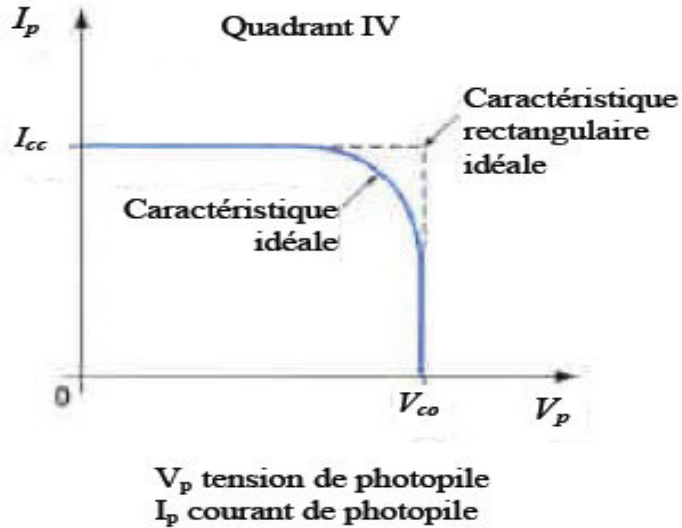


Figure II.9 : Caractéristique idéale d'une cellule P-V.

II.2.2.3.5. Influence de l'intensité du rayonnement

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C. La figure (2.10) présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

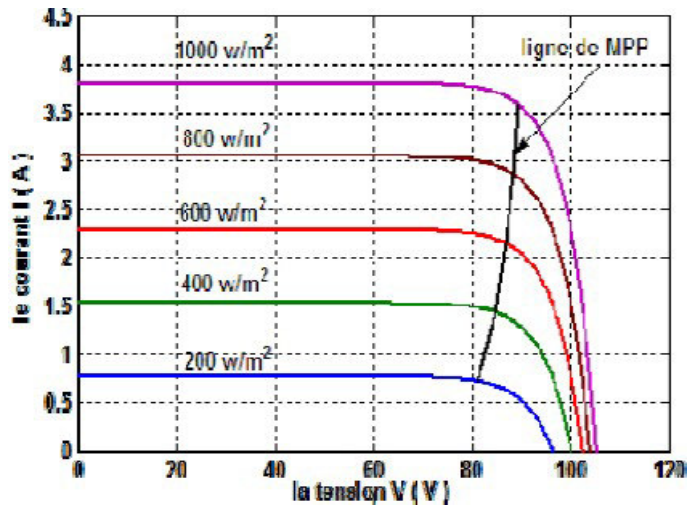
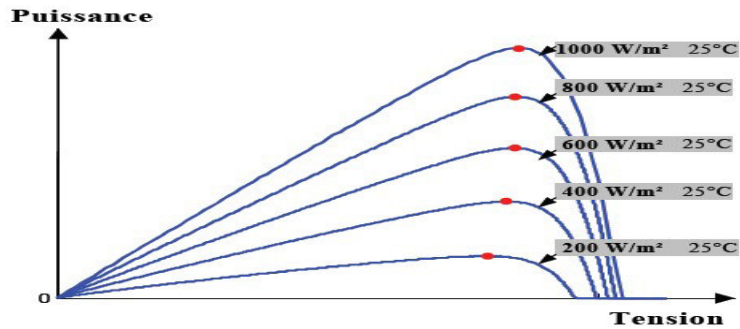


Figure II.10. Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque pour différents rayonnements.

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclaircissement [28].

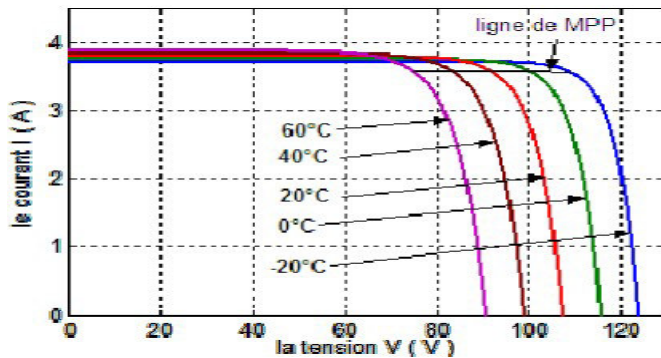
La figure (II.11) présente un exemple des courbes puissance-tension pour différents niveaux de rayonnement :



**Figure II.11.** Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque pour différents rayonnements.

**II.2.2.3.6. Influence de la température**

La figure (II.12) présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV :

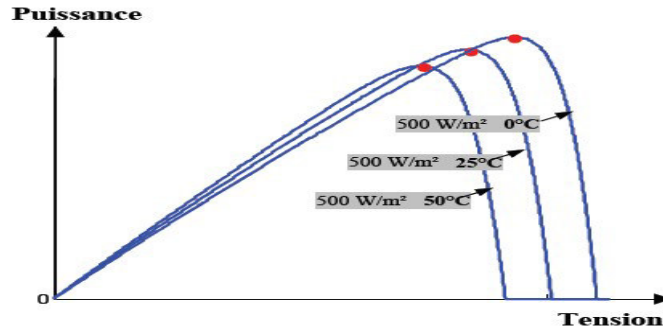


**Figure II.12 :** Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque pour différents températures.

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site devra être prise en compte.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% par degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25 °C [25].

La figure (II.13) présente des courbes puissance-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV :



**Figure II.13.** Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque pour différents températures.

**II.3. Modélisation de la chaîne éolienne**

Le générateur éolien, constitué d'une turbine à axe horizontal couplée directement à une génératrice synchrone à aimants permanents raccordée à un bus continu par l'intermédiaire d'un redresseur, est représenté en figure II.20. La modélisation de ces différents organes va être examinée dans ce qui suit.

**II.3.1. Modèle du vent**

**II.3.1.1. Correction de la vitesse de vent avec l'altitude**

La vitesse du vent augmente avec l'altitude par rapport au sol. Nous avons donc converti les vitesses de vent à  $h_0$  en vitesses de vent à la hauteur de moyeu  $h$  par la relation de Justus [24] :

$$V_h = V_{ho} \cdot \left(\frac{h}{ho}\right)^\alpha \tag{II.42}$$

Où  $\alpha$  est le coefficient de correction souvent considéré comme étant égal à 0,15. Sa valeur dépend de la nature du terrain. Les valeurs habituelles sont montrées dans le Tableau II.1 [37].

Nature du terrain	$\alpha$
Surface de l'eau	0.1
Plaine herbeuse	0.15
Cultures agricoles	0.2
Végétation avec peu d'arbres	0.2
Bois	0.25
Plusieurs bâtiments	0.25
Terrain accidenté, montagneux	0.25

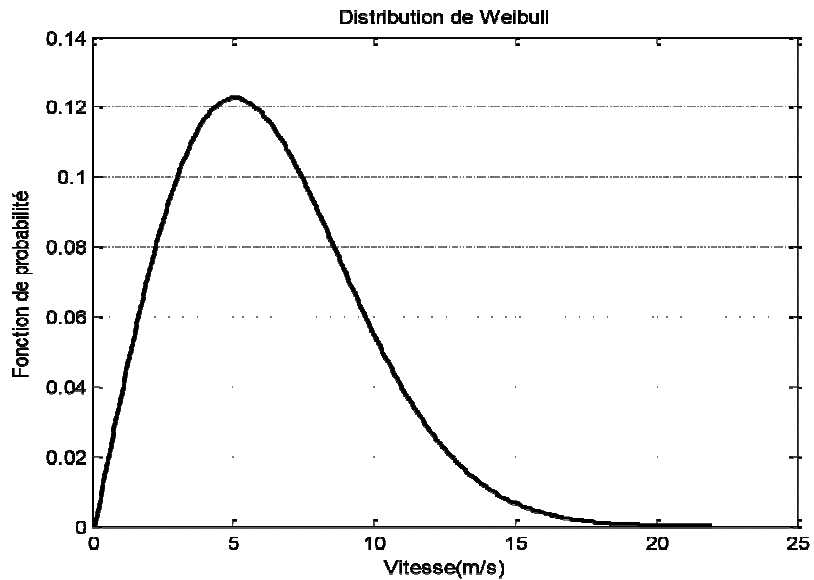
**Tableau II.1.** Valeurs du coefficient de correction.

**II.3.1.2. Distribution de Weibull**

Il existe plusieurs méthodes de représentation et d’analyse pour quantifier le potentiel éolien d’un site. Ces distributions sont généralement approximées par des lois, notamment la fonction de distribution de Weibull [22]

$$F(v) = \frac{K}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{K-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^K\right] \tag{II.43}$$

La figure II.14 est obtenue grâce à l’équation (II.40) 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 [22].



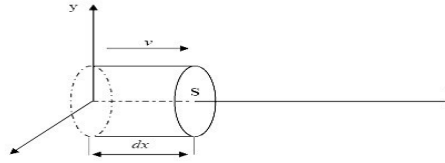
**Figure II.14.** Exemple de la distribution de Weibull.

**II.3.2. Modèle de la turbine**

**II.3.2.1. Puissance récupérable par une turbine**

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l’énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L’énergie cinétique d’une colonne d’air de longueur  $dx$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$ , animée d’une vitesse  $v$ , s’écrit:

$$dEc = \frac{1}{2} \rho S dx v^2 \tag{II.44}$$



**Figure II.15 :** Colonne d'air animée d'une vitesse  $V$ .

La puissance  $P_v$  extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

On a  $dx = v dt$ , on déduit l'expression de  $P_v$  :

$$P_v = \frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \tag{II.45}$$

$\rho$  : Densité volumique de l'air ( $\text{Kg/m}^3$ )

$v$  : Vitesse instantanée du vent (m/s)

$E_c$  : Energie cinétique du vent (Joules).

**II.3.2.2. Loi de Betz**

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert BETZ en 1929, qui suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini en aval d'une vitesse  $V_2$ . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique du vent, la vitesse  $V_2$  est nécessairement inférieure à  $V_1$ . Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant. Soit  $V'$  la vitesse au travers de  $S$ , la section balayée par les pales de l'éolienne, et  $M$  la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation de l'énergie cinétique  $\Delta Ec$  est [23]:

$$\Delta Ec = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (V_1^2 - V_2^2) \tag{II.46}$$

La puissance aérodynamique de l'éolienne

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V_1^2 - V_2^2) \tag{II.47}$$

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

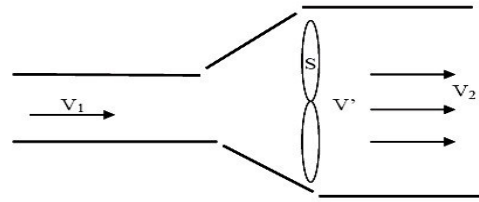
$$F = \rho \cdot s \cdot V' \cdot (V_1 - V_2) \tag{II.48}$$

$$P_{aer} = F \cdot V' = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot V'^2 \cdot (V_1 - V_2) \tag{II.49}$$

En identifiant les équations, il vient :

$$V' = \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{II.50}$$

$$P_{aer} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \tag{II.51}$$



**Figure II.16 :** Théorie de Betz, Schéma de principe.

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

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

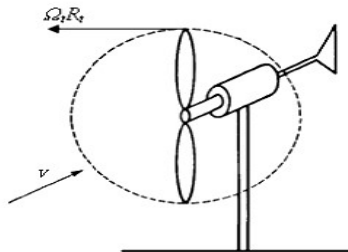
$$P_{aer \max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho S \cdot V_1^3}{2} = \frac{16}{27} \cdot P_v \quad (II.52)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde.

**II.3.2.3. Vitesse normalisée**

On définit la vitesse normalisée  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine  $\Omega_t \cdot R_t$  sur la vitesse instantanée de vent et donné par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V} \quad (II.53)$$



**Figure II.17 :** Vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aubage  $\Omega_t \cdot R_t$

V : Vitesse de vent (m/s).

$\Omega_t$ : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s)

$R_t$ : Rayon de la surface balayée(m).

**II.3.2.4. Coefficient de puissance**

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de la puissance maximale théorique  $P_{éol \max}$  peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent [22] :

$$P_{éol} = C_p \cdot P_v = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (II.54)$$

$$C_p = \frac{2.P_{\acute{e}ol}}{\rho.S.V^3} \tag{II.55}$$

Le coefficient de puissance maximal théorique est défini

$$C_p^{opt} = \frac{P_{\acute{e}ol,max}}{P_v} = 0.59 \tag{II.56}$$

$C_p^{opt}$  : Étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance  $C_p$ . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale  $\lambda_{opt}$  pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale  $V_n$  et une vitesse de rotation nominale  $\Omega_{tn}$ .

La figure II.18 donne une vue sur les coefficients de puissance  $C_p$  habituels en fonction de la vitesse réduite  $\lambda$  pour différents types d'éoliennes.

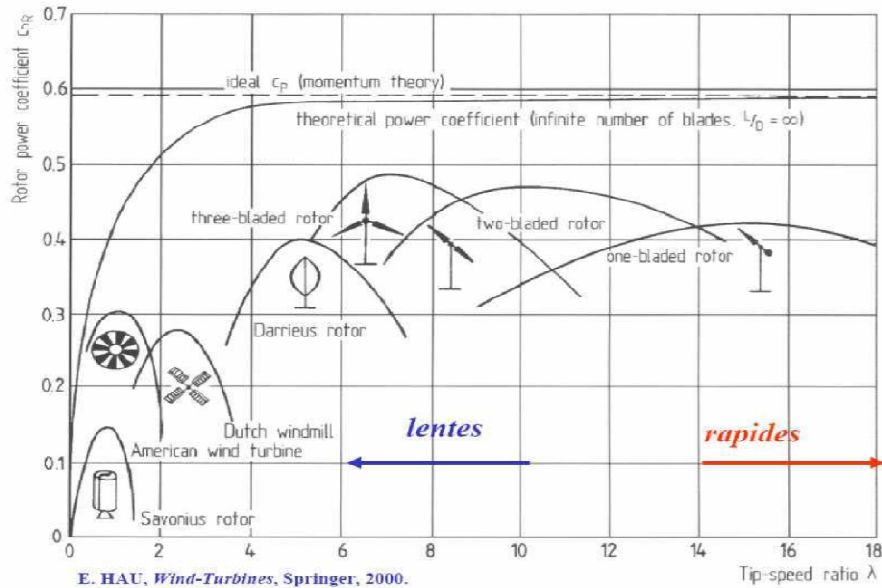


Figure II.18 : Courbes caractéristiques des aérogénérateurs.

II.3.2.5. Coefficient de couple

Le coefficient de couple  $C_m$  est assez proche du coefficient de puissance  $C_p$ . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation  $\Omega_t$  nulle, ce qui correspond à une valeur de  $C_p$  nulle pour une valeur de  $C_m$  non nulle [42].

la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) . \rho . \pi . R_t^2 . V^3 \tag{II.57}$$

avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_t . R_t}{V} \tag{II.58}$$

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

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t.P_m}{\lambda.V} = \frac{C_p}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^3 \cdot V^2 \quad (II.59)$$

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

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{2T_t}{\rho \cdot St \cdot R_t \cdot V^2} \quad (II.60)$$

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

### II.3.3. Modèle de l'arbre de la machine

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par [23] :

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega}{dt} = C_{eol} - C_{em} - (f_m + f_t)\Omega \quad (II.61)$$

Avec :

$J_m$ : l'inertie de la machine.

$f_m$ : le coefficient de frottement de la machine.

$J_t$  : l'inertie de la turbine.

$f_t$ : le coefficient de frottement des pâles.

$C_{eol}$ : le couple statique fournie par l'éolienne.

$C_{em}$ : le couple électromagnétique de la génératrice.

On dispose uniquement des paramètres mécaniques de la machine et de l'inertie de la voilure, C'est pour cela que dans cette application, on ne considère que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure n'est pas pris en compte).

$$J = J_t + J_m = J_t \quad (II.62)$$

$$f = f_t + f_m = f_m \quad (II.62)$$

Par suite, le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne éolienne est donné par l'équation différentielle suivante :

$$C_{eol} = Jt \frac{d\Omega}{dt} + C_{em} + f_m\Omega \quad (II.63)$$

### II.3.4. Modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (Performances, robustesse, ...), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour une application en générateur couplé à une turbine éolienne. Les concepteurs nous donnent des précisions concernant la façon de modéliser ce composant.

Le modèle de la machine synchrone possède quatre sorties de type électrique : les trois bornes des enroulements stator et une borne représentant le neutre. Les phases sont connectées en étoile [22].

La génératrice synchrone à aimant permanent est modélisée dans un repère abc. Le modèle circuit en termes de tension et de courant sous forme matricielle est donné par [23] :

$$P_{\text{éol}} - \text{moy} = \int_0^{\infty} P_{\text{éol}}(v) \cdot f(v) \cdot dv \tag{II.64}$$

$$\text{Avec : } [V]_3 = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, [e]_3 = P\phi_f\Omega \begin{bmatrix} \sin(P\Omega t) \\ \sin(P\Omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(P\Omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \text{ et } [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \tag{II.65}$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{\text{em}}(t) = \frac{e_a(t) \cdot i_a(t) + e_b(t) \cdot i_b(t) + e_c(t) \cdot i_c(t)}{\Omega(t)} \tag{II.66}$$

Où

$v_a, v_b, v_c$  sont les valeurs instantanées des tensions triphasées,

$i_a, i_b, i_c$  sont les valeurs instantanées des courants triphasés,

$i_a R_s$  est la résistance des enroulements,

$i_a L_s$  est l'inductance des enroulements,

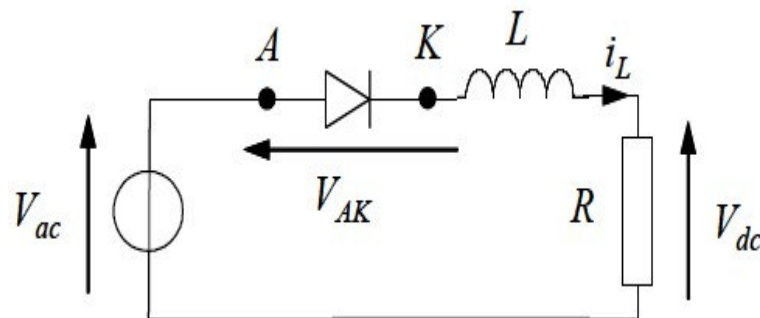
$P$  est le nombre de paires des pôles de la génératrice,

$\phi_f$  est le flux magnétique des aimants,

$i_a \Omega$  est la vitesse de rotation de la génératrice.

### II.3.5. Modélisation du redresseur

#### II.3.5.1. Etude d'un redresseur monophasé à diode



**Figure II.19** : Redresseur monophasé à diode.

#### II.3.5.2. Rappel sur les règles de conduction d'une diode

Une diode se met à conduire lorsque la tension anode-cathode devient positive ( $V_{AK} > 0$ ).

Lorsqu'elle est conductrice, la tension à ses bornes est nulle (cas d'une diode parfaite) ou plus généralement égale à une valeur de seuil  $U_{d0}$  (typiquement comprise entre 0.5 et 1V). Cette valeur reste toutefois négligeable devant les autres chutes de tension dans le circuit. Le courant dans la diode est alors imposé par le reste du circuit.

Une diode se bloque lorsque le courant anode-cathode qui la traverse s'annule ( $i_{AK} = 0$ ). La tension anode-cathode est alors imposée par le reste du circuit.

• **Modèle du redresseur monophasé à diode**

Le comportement du redresseur peut être caractérisé en exprimant le courant dans l'inductance :

$$i_L = \frac{1}{L} \int V_L dt \tag{II.67}$$

où la tension  $V_L$  aux bornes de l'inductance dépend de l'état de conduction  $c$  de la diode. En effet, lorsque la diode est conductrice ( $c = 1$ ), on a :

$$V_L = V_{ac} - V_{dc} \tag{II.68}$$

et lorsque celle-ci est bloquée ( $c = 0$ ) :

$$V_L = 0 \tag{II.69}$$

Ainsi, de façon générale, en fonction de l'état de conduction  $c$  de la diode, la tension aux bornes de l'inductance s'exprime par :

$$V_L = c(V_{ac} - V_{dc}) \tag{II.70}$$

En exprimant la tension aux bornes de la charge résistive en fonction du courant dans l'inductance,

$$V_{dc} = Ri_L \tag{II.71}$$

L'équation devient :

$$i_L = \frac{1}{L} \int c(V_{ac} - Ri_L) dt \tag{II.72}$$

Reste à établir l'état de conduction  $c$  de la diode. A partir des règles élémentaires évoquées précédemment en début de paragraphe, nous pouvons dire que la diode est conductrice ( $c = 1$ ) si et seulement si l'une des conditions suivantes est vérifiée :

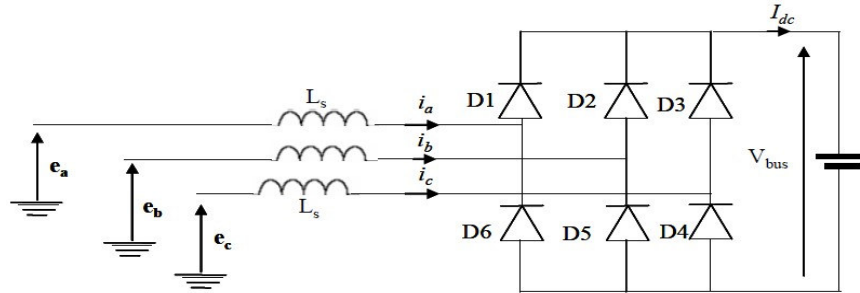
$$V_{ac} - V_{dc} > 0 \quad \text{ou} \quad i_L > 0$$

Le premier terme traduit la condition d'amorçage de la diode. En effet, lorsque la diode est bloquée, nous avons  $V_{AK} = V_{ac} - V_{dc}$ . Le deuxième terme indique la continuité de la conduction tant que le courant dans la diode  $i_L = i_{AK}$  reste strictement positif. Si l'une des deux conditions précédente n'est pas remplie, la diode est bloquée ( $c = 0$ ) [20].

**II.3.5.2. Modèle d'un pont de diode**

On considère un redresseur alimenté par une source de tension, et débitant sur une batterie supposée idéale. Dans un premier temps, on considère que l'impédance de la source est nulle. Dans ce cas, les courants de ligne  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  prennent à tour de rôle la valeur (et forme) du courant continu  $I_{dc}$ . Chaque diode assure la conduction du courant pendant 1/3 de la période.

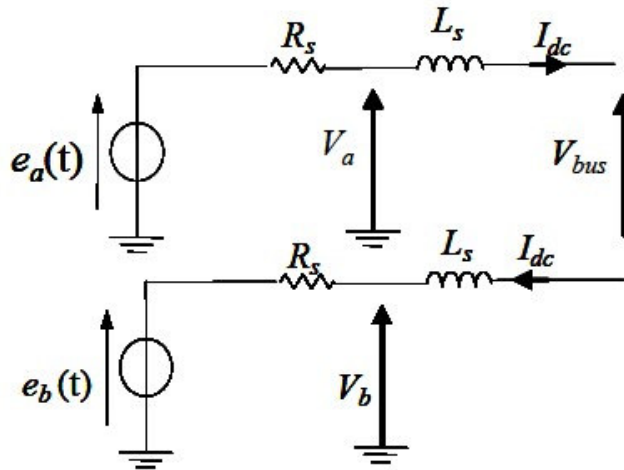
Avec l’hypothèse d’une impédance de source nulle, le courant s’établit instantanément à sa valeur  $I_{dc}$  lorsqu’une diode devient conductrice [23].



**Figure II.20 :** Schéma d’un pont de diodes.

Le schéma équivalent pendant une séquence de conduction (par exemple phases 1 et 2) est représenté sur Figure II.21.

$$\frac{dI_{dc}}{dt} = \frac{1}{2L_s} (V_a - V_b - V_{bus}) \tag{II.73}$$



**Figure II.21 :** Schéma équivalent d’une séquence en conduction normale.

**II.3.6. Puissance éolienne produite**

L’éolienne trouvée au marché est caractérisée par sa puissance nominale  $P_n$ , la puissance électrique à la sortie de la génératrice, cette puissance est fournie lorsque le vent souffle à la vitesse nominale  $V_n$ .

$$P_{éol-moy} = \int_0^{\infty} P_{éol}(v) \cdot f(v) \cdot dv \tag{II.74}$$

Où :

$f(v)$ : la probabilité de la vitesse  $v$   $P_{éol}$  : la puissance résultante d’une vitesse  $v$

La puissance produite par l'aérogénérateur est calculée en fonction de la vitesse de vent selon l'équation (2.60) [44].

$$P_{\text{éol}} = P_n \cdot \frac{v - v_d}{v_n^k - v_d} \quad (\text{II.75})$$

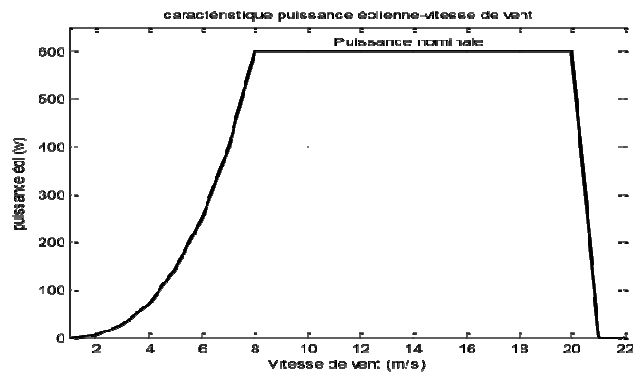
$P_n$ : puissance nominale de l'éolienne,

$v_d$  : vitesse de démarrage de la turbine

$v_n$  vitesse nominale de la turbine,

$v_c$ : vitesse de coupure de la turbine,  $k$  : le facteur de forme.

La variation de la puissance produite en fonction de la vitesse de vent est montrée dans la figure II.22.



**Figure II.22 :** Puissance de l'aérogénérateur en fonction de la vitesse de vent.

La puissance moyenne produite par l'aérogénérateur est donnée par :

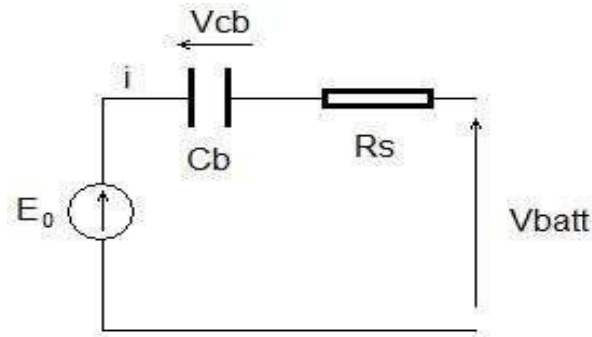
$$P_{\text{éol}_moy} = P_n \cdot \left[ \frac{\left[ \exp\left(-\left(\frac{v_d}{c}\right)^k\right) \right] - \exp\left(-\left(\frac{v_n}{c}\right)^k\right)}{\left(\frac{v_n}{c}\right)^k - \left(\frac{v_d}{c}\right)^k} \right] - \exp\left(-\left(\frac{v_c}{c}\right)^k\right) \quad (\text{II.76})$$

Il suffit d'introduire le rendement du pont de diodes à la puissance moyenne produite par l'aérogénérateur  $P_{\text{éol}_moy}$  pour trouver la puissance éolienne fournie au bus CC.

#### II.4. Modélisation du dispositif de stockage

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Notre choix s'est porté sur deux modèles : le modèle dit « CIEMAT » relativement complet, malgré quelques imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge, et le modèle R-C [2].

**Le modèle R-C** : le modèle électrique simple de la batterie comprend une  $fE_0$  modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie ( $C_b$ ) et une résistance interne ( $R_s$ ).



**Figure II.23** : Modèle R-C de la batterie [19].

Nous avons donc :

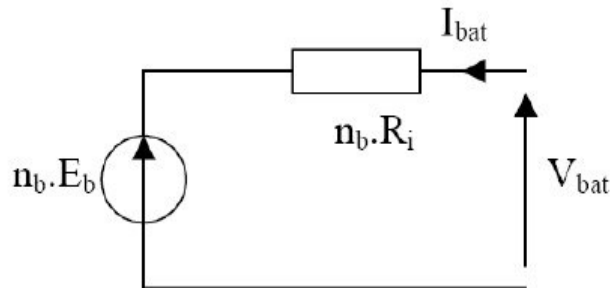
$$V_{batt} = E_0 - R_s \cdot i - V_{Cb} \tag{II.77}$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_b} \tag{II.78}$$

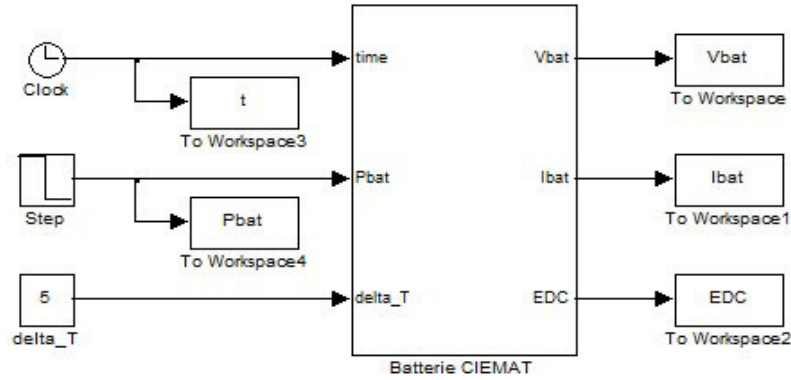
Avec  $C_b$  la capacité (Ah) nominale de la batterie et  $Q_d$  la quantité de charge manquante par rapport à  $C_b$ .

**Le modèle « CIEMAT »** : Ce modèle est basé sur le schéma suivant (Figure II.24) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :



**Figure II.24** : Schéma équivalent de  $n_b$  éléments en série [19]

Ce modèle définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction du courant imposé, de son état de charge et de la température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge et intègre la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène) [26].



**Figure II.25 :**Modèle CIEMAT de la batterie au plomb sous Simulink

Les entrées du modèle de la figure II.25 sont donc la puissance et l'écart de température par rapport à la température nominale fixée à 25°C. Le calcul de l'état de charge se fait en interne et permet de calculer la tension.

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{V_{bat}} \quad (II.79)$$

Les expressions des grandeurs de la batterie sont exprimées ci-dessous.

L'expression générale de la tension batterie :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_i \cdot I_{bat} \quad (II.80)$$

La valeur de la résistance interne de la batterie est calculée en fonction de sa tension nominale.

L'expression de l'état de charge :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_b} \quad (II.81)$$

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes [19] :

- tension en décharge :

$$V_{bat\_dé} = n_b \cdot [1,965 + 1,12 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \cdot \left( \frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1,3}} + \frac{0,27}{(EDC)^{1,5}} + 0,02 \right) \cdot (1 - 0,007 \cdot \Delta T) \quad (II.82)$$

- tension en charge :

$$V_{bat\_ch} = n_b \cdot [2 + 0,16 \cdot EDC] + n_b \cdot \frac{I_{bat}}{C_{10}} \cdot \left( \frac{6}{1 + I_{bat}^{0,86}} + \frac{0,48}{(1 - EDC)^{1,2}} + 0,036 \right) \cdot (1 - 0,02 \cdot \Delta T) \quad (II.83)$$

### II.5.Modélisation du hacheur réversible en courant

Les équations différentielles définissant le fonctionnement des deux hacheurs, ont été résolues en utilisant un modèle en valeurs moyennes. Sachant que la commande des interrupteurs  $T_2$  et  $T_1$  est simultanée avec des rapports cycliques  $d_b$  et  $1 - d_b$  complémentaires, le fonctionnement du hacheur réversible en courant est décrit par [1]:

$$\frac{di_{bat}}{dt} = \frac{1}{L} (d_b \cdot V_{bus} - V_{bat}) \quad (II.84)$$

En appliquant la loi de conservation de la puissance, le courant injecté ou absorbé du bus à CC s'exprime :

$$i_{cb} = d_b i_{bat} \quad (II.85)$$

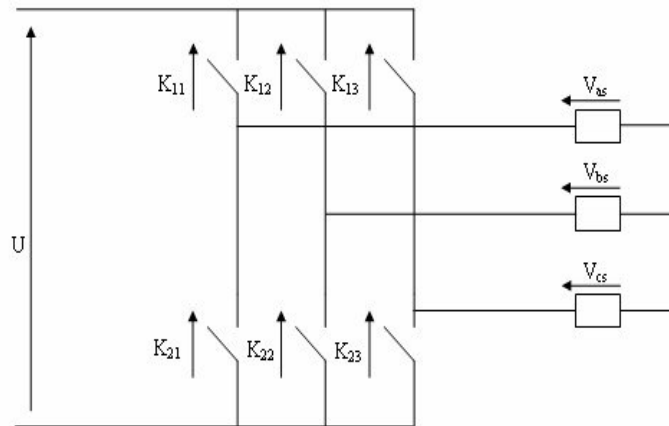
Le rapport cyclique  $d_b$  est obtenu à partir d'un régulateur PI ayant comme entrée l'erreur de tension sur le bus à CC.

**II.5.1 Modélisation de l'onduleur**

L'association d'un transistor  $T_i$  et d'une diode  $D_i$  donne un composant bidirectionnel  $K_i$ . Comme les commandes des deux transistors du même bras sont complémentaires, nous pouvons remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions comme l'indique la figure (II.26) [5].

Soit  $F_i$  l'état de l'interrupteur  $K_i$ , il est donné par:

$$F_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est ouvert et } T'_i \text{ fermé} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est fermé et } T'_i \text{ ouvert} \end{cases} \quad (II.86)$$



**Figure II.26.** Représentation des composants bidirectionnels.

Les tensions composées à la sortie de l'onduleur sont données par:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} F_1 & -F_2 \\ F_2 & -F_3 \\ F_3 & -F_1 \end{bmatrix} \quad (II.87)$$

Par conséquent, les tensions simples et le courant  $I_S$  à l'entrée de l'onduleur s'expriment en fonction des fonctions logiques comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} 2F_1 & -F_2 & -F_3 \\ -F_2 & 2F_2 & -F_3 \\ -F_1 & -F_2 & 2F_3 \end{bmatrix} \quad (II.88)$$

$$I_S = F_1 \cdot I_{sa} + F_2 \cdot I_{sb} + F_3 \cdot I_{sc} \quad (II.89)$$

### Conclusion

Dans ce chapitre, les modèles mathématiques de système étudié sont présentés. On commence avec les modèles des données météorologiques au site. On passe après à la chaîne photovoltaïque, où nous utilisons deux méthodes de maximisation de puissance. Ensuite, on étudie la chaîne éolienne : vent, turbine, génératrice synchrone et pont à diodes ; Où on donne un modèle qui peut calculer la puissance éolienne produite. On continue avec les modèles de la batterie et du hacheur réversible en courant et du bus continu. On finit par le modèle de l'onduleur.

# **CHAPITRE III**

## **SIMULATION DE SYSTEME HYBRIDE**

---

## Introduction

Dans ce chapitre on procédera d'abord à la présentation de logiciel utilisé qui est HOMER, Après en passera à la présentation du site choisi pour notre étude (hôpital de Thenia), ses coordonnées géographique, et l'évaluation détaillée de ses ressources, car cela nous permet à l'estimation des besoins énergétique, Cette étape est indispensable, car cela nous permet d'avoir un meilleur dimensionnement et optimisation des éléments de notre installation.

### III .1.Présentation du logiciel « HOMER »

HOMER (Hybride Optimisation Model for Electric Renewable) est un environnement de simulation et d'optimisation des installations simple et hybride, autonomes ou connectée au réseau, intégrant les énergies renouvelable.il est élaboré par NREL (National Renewabale Energy Laboratory), un organisme Américain chargé de la promotion et du développement des énergies renouvelables.

Pour simuler une installation donnée, il faut définir tous les éléments de cette dernière, en utilisant les composants définis dans la bibliothèque du logiciel (turbine, éolienne, hydraulique, les batteries, électrolyseurs, combustibles, biomasse...) par la commande Add/Remove.

Si un composant donné ne figure pas dans cette bibliothèque, il faut le rajouté en introduisant toutes ces caractéristiques techniques ainsi que son cout. Il faut aussi spécifier le nombre de chaque composant dans l'installation à simuler. Les caractéristiques d'un composant déjà existant dans la bibliothèque peuvent être modifiées.

Les potentiels renouvelable (éolienne, solaire, biomasse...) introduit soit manuellement, soit manuellement, soit importé via internet ou d'un fichier texte. Les charges sont définies par leur nature AC ou DC et leur distribution horaire.

Les résultats de simulation par HOMER sont donnés sous forme de combinaison (configuration) réalisables (techniquement et économiquement) des éléments dans l'installation.

#### III.1.1. Fonctionnement du logiciel HOMER

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

Il effectue ses calculs du bilan d'énergie pour chaque configuration du système que nous souhaitons examiner. Il détermine ensuite si la configuration est faisable, c'est-à-dire, si elle peut répondre à la demande d'électricité dans les conditions que nous avons spécifié, et les estimations du coût d'installation et de fonctionnement du système au cours de la durée de vie du

projet. Il calculera le coût du système en tenant compte des différents coûts tels que le capital, le remplacement, l'exploitation et l'entretien.

### III.1.2.Optimisation

Après avoir réuni toutes les configurations possibles du système, il y aura un classement par ordre croissant de la valeur Actuel Nette(NPC). Pour chacune de ces solutions possibles, le logiciel HOMER fournit tous les paramètres de fonctionnement des composants et de l'ensemble de l'installation (la fraction de l'énergie renouvelable les émissions de gaz, le cout spécifique de l'énergie total produite consommée et l'excès de l'énergie...)

### III.1.3.Analyse de sensibilité

Lorsque les variables de sensibilité sont définis comme entrées, HOMER répète le processus d'optimisation pour chaque variable de la sensibilité qui sera spécifique. Si par exemple, la vitesse du vent est définie comme une variable de sensibilité, HOMER simule les configurations système pour la gamme de vitesses de vent choisie.

## III.2.PRÉSENTATION DE L'EPH THENIA

L'établissement hospitalier de Thenia a été créé par décret exécutif N° 07/140 de la 29/05/2007 portant création et organisation des EPH et EPSP mis en application à compter du 01/01/2008.

Etablissement de chef lieu de wilaya, il est composé de 280 lits répartis comme suit : hôpital composé de 205 lits d'hospitalisation situés au niveau de la commune de Thenia et d'un service de traumatologie de 45lits d'hospitalisation sis au niveau de la commune de Boumerdes, en plus des 30lits au niveau des urgences.

Il est à équidistance (50Km) entre les villes d'Alger et de Tizi Ouzou.

- ☒ Au carrefour d'une zone rurale et une zone de forte urbanisation.
- ☒ Sur l'axe autoroutier de l'est axe très fréquenté et réputé très meurtrier.

L'EPH assure principalement une mission curative qui consiste essentiellement à prodiguer des soins et traitement aux patients hospitalisés.

La mission préventive, conformément au décret exécutif déjà cité est à la charge des structures extra hospitalières relevant des EPSP de Boumerdes et Khemis el Khechna.



**Figure III.1 :** Présentation de l'hôpital de Thenia

Dans un projet d'extension, un nouveau bloc de l'hôpital est construit...



**Figure III.2 :** Extension nouveau bloc de l'hôpital de Thenia.

Le nouveau bloc contient une salle de réanimation composé de 10 lits.



**Figure III.3 :** Une salle de réanimation

Et une grande salle de soin et des urgences ...



**Figure III.4 :** La salle de soin des urgences

Aussi un service de dialyse de sang,



**Figure III.5 :** la salle de dialyse de sang.

Aussi un service de chirurgie, avec un bloc opératoire.



**Figure III.6 :** service de chirurgie.

Qui nécessite une phase post opératoire



**Figure III.7 :** La salle opératoire

Et une phase d'hospitalisation aussi avec prise en charge complète.



**Figure III.8 :** Salle d'hospitalisation

Ce bloc utilise les dernières technologies médicales, le confort est assuré avec la disponibilité des moyens de suivi de tous les étapes d'hospitalisation.

De ce fait il y a une consommation d'énergie qui a été évaluée par les services techniques et qui s'élève à 1000 KVA.

### **III.3. Simulation numérique du système hybride**

La simulation de notre système a été effectuée par le logiciel Homer qui nécessite des données précises à introduire.

Pour trouver la meilleure solution adéquate pour un système hybride qui pourra résoudre tous les anomalies énergétiques, dans cet hôpital, nous avons adopté quatre scénarios possibles, deux avec le groupe diesel existant de capacité de 1000 KW, tout en faisant varier l'apport du photovoltaïque et celui de l'éolienne.

Plusieurs paramètres ont été étudiés et qui sont cités dans ce chapitre.

### III.3.1. Situation géographique : problématique

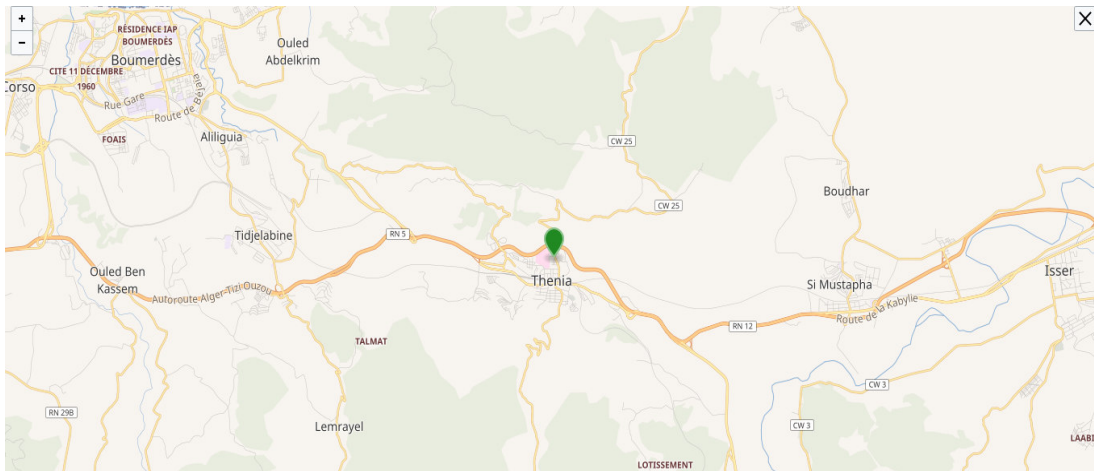
Le site choisi c'est bien la situation du cas étudié et qui est l'hôpital de Thénia.

**Situation géographique :** Nous avons songé à installer un système hybride pour alimenter le nouveau bloc de l'hôpital situé dans la ville de Thénia, et qui présente les coordonnées géographiques suivantes :

Le tableau ci-après, représente les caractéristiques géographiques de site de Thénia :

Altitude	Longitude	L'altitude
36,733°	3,55°	228°

**Tableau III.1 :** Caractéristique géographique du site de Thénia



**Figure III. 9 :** Situation : Carte de Thénia

### III.3.2. Les données météorologiques

#### a) Potentiel éolien de Thénia :

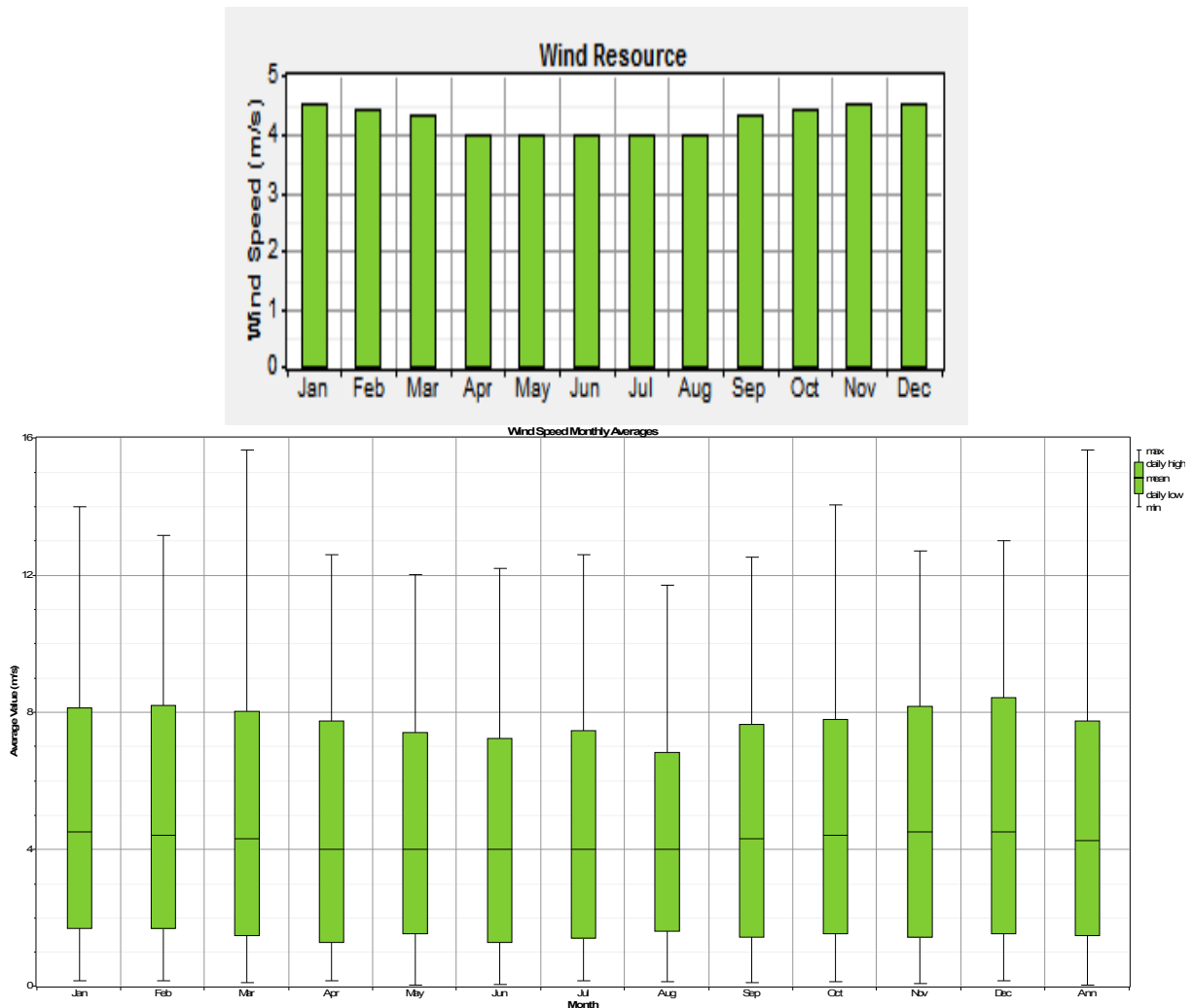
Les vitesses moyennes du vent à 4 m/s à hauteur de 11 m du sol pour le site de Thénia fournies par les services de météorologies ONM- DAR EL BEIDA sont reportées sur le tableau suivant:

Mois	Vitesse du Vent (m /s)
Janvier	4.50
Février	4.40
Mars	4.30
Avril	4.00
Mai	4.00
Juin	4.00
Juillet	4.00
Ouate	4.00
Septembre	4.30

Mois	Vitesse du vent (m /s)
Octobre	4.40
Novembre	4.50
Décembre	4.50

**Tableau III.2 :** Vitesses moyennes mensuelles du vent

La valeur mensuelle de la vitesse moyenne du vent est de 4m/s, et la simulation par HOMER de ces vitesses du vent est représentée comme suit :

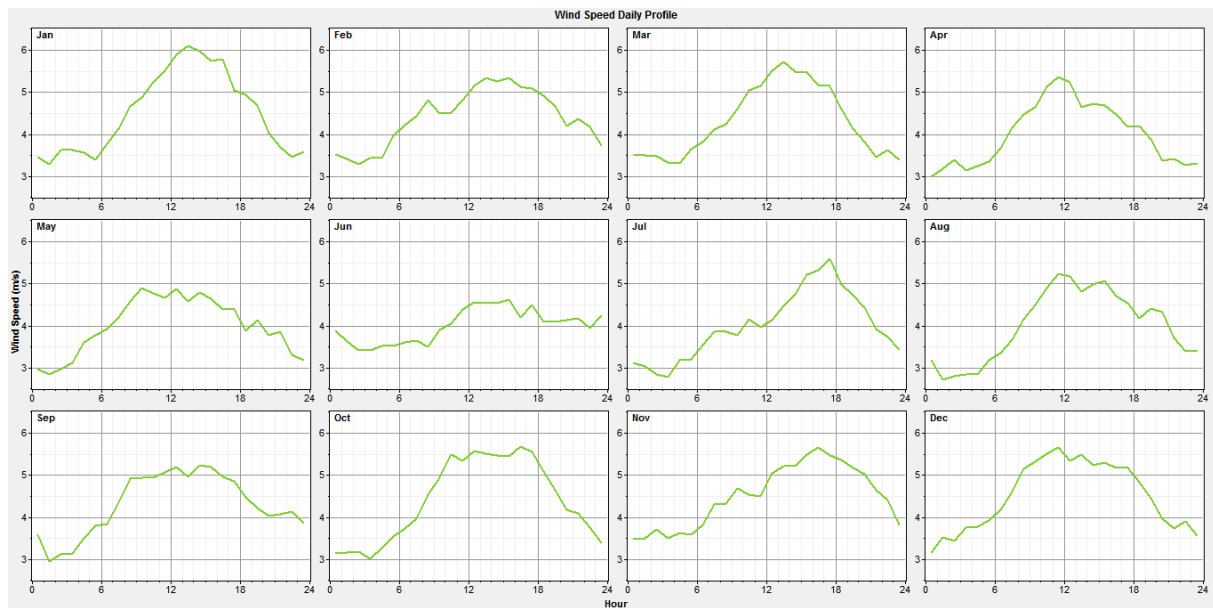


**Figure III. 10 :** Evolution mensuelle de vitesse moyenne du vent pour la région de Thénia.

Les vitesses du vent pour le site de Thénia sont en variation continue avec le temps, on remarque que la vitesse moyenne est de 4.5m/s. La vitesse la plus grande de l'ordre de 4.5m/s est enregistrée durant les mois de janvier, février, mars, et septembre, octobre, novembre, décembre, cela peut être expliqué par la présence des vents forts durant la période de printemps automne. La vitesse la plus faible environ de 4m/s est enregistrée durant le reste du mois de printemps (avril, mai) et la saison de l'été (juin, juillet).

### III.3.3. La variation horaire des vitesses du vent :

La variation horaire des vitesses du vent des journées typiques de chaque mois de l'année pour le site de Thénia est représentée sur la figure suivante :



**Figure III.11 :** Le profil mensuel de la vitesse du vent des journées typiques de chaque mois de l'année.

Le site de Thénia est considéré moyennement venté par rapport à d'autres sites de la wilaya de Boumerdès .

### III.3.4. Potentiel solaire de Thénia :

De même que la vitesse du vent, des mesures de l'irradiation solaire ont été prises sur site ; en utilisant l'orientation et l'inclinaison des modules PV, l'altitude du lieu et les valeurs de rayonnement global.

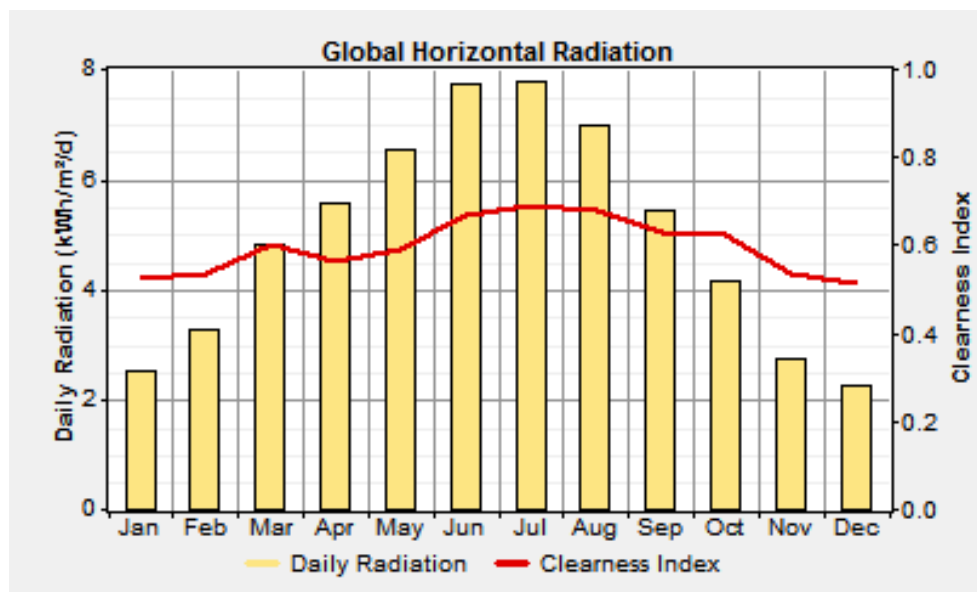
Le tableau suivant indique en (KWh/m<sup>2</sup>/j), pour chaque mois, la quantité moyenne de l'énergie solaire que reçoit chaque jour 1m<sup>2</sup> de surface horizontale.

Le tableau ci-dessous représente l'irradiation moyenne mensuelle et le facteur d'éclaircissement de la région de Thénia pour chaque mois de l'année.

Mois	Facteur d'éclairement	Irradiation (KWh/m <sup>2</sup> /J)
Janvier	0,524	2,510
Février	0,534	3,280
Mars	0,601	4,820
Avril	0,566	5,570
Mai	0,592	6,560
Juin	0,669	7,740
Juillet	0,690	7,790
Aout	0,681	7,000
Septembre	0,628	5,420
Octobre	0,625	4,170
Novembre	0,537	2,730
Décembre	0,516	2,260

**Tableau III.3 :** Irradiation solaire moyenne mensuelle de la région de Thenia

L'évolution mensuelle de l'irradiation et l'éclairement est représentée dans la figure suivante (l'irradiation en jaune et le facteur d'éclairement en rouge) :

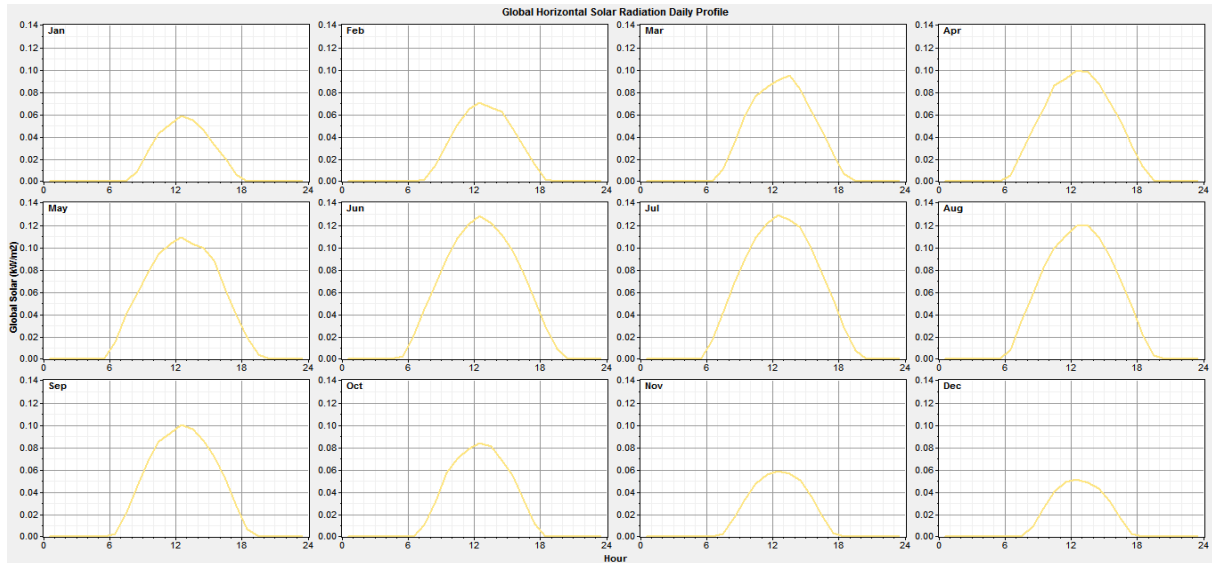


**Figure III.12 :** Evolution annuelle de l'irradiation solaire

D'après la figure précédente, on remarque que l'irradiation solaire est croissante durant le mois de janvier jusqu'au mois de juin, et décroissante du mois de juillet jusqu'à décembre, atteignant des valeurs minimales de 2,5 KWh/m<sup>2</sup>/j en décembre et janvier et des valeurs maximales en juin et juillet avec 7,8 KWh/m<sup>2</sup>/j.

**III.3.5.La variation horaire de l’irradiation solaire**

La variation horaire de l’irradiation des journées typiques de chaque mois de l’année (figure III.13) représente les valeurs optimales atteintes chaque jour à midi , les valeurs maximales journalières correspondent à un minimum durant le mois de décembre avec une valeur de 450 W/m<sup>2</sup> et le maximum atteint pendant le mois de juin et juillet avec la valeur de 1300 W/m<sup>2</sup> avec une durée d’ensoleillement qui s’étale de 10 heures pendant les mois de janvier et décembre, allant jusqu’à 15 heures pendant les mois de juin et juillet.



**Figure III.13:**profil de l’irradiation des journées typiques de chaque mois de l’année.

**III.3.6.La charge horaire de l’hôpital de Thenia**

Dans notre étude nous avons choisi une charge de type courant alternatif fonctionnant en permanence durant toute l’année avec une valeur constante ( moyenne de 19110 KWh /Jour) et un pic de 950 Kw.

La distribution journalière horaire de cette charge et son profil journalier sont donnés respectivement en tableau 4 et figure 14.

Heure	Charge (Kw)	Heure	Charge (Kw)
00:00 - 01:00	700.000	12:00 - 13:00	780.000
01:00 - 02:00	760.000	13:00 - 14:00	800.000
02:00 - 03:00	680.000	14:00 - 15:00	760.000
03:00 - 04:00	730.000	15:00 - 16:00	730.000
04:00 - 05:00	750.000	16:00 - 17:00	700.000
05:00 - 06:00	830.000	17:00 - 18:00	780.000
06:00 - 07:00	850.000	18:00 - 19:00	810.000

Heure	Charge (Kw)	Heure	Charge (Kw)
07:00 - 08:00	780.000	19:00 - 20:00	840.000
08:00 - 09:00	950.000	20:00 - 21:00	840.000
09:00 - 10:00	920.000	21:00 - 22:00	850.000
10:00 - 11:00	900.000	22:00 - 23:00	830.000
11:00 - 12:00	900.000	23:00 - 00:00	790.000

Tableau III.4 : la distribution journalière de la charge électrique

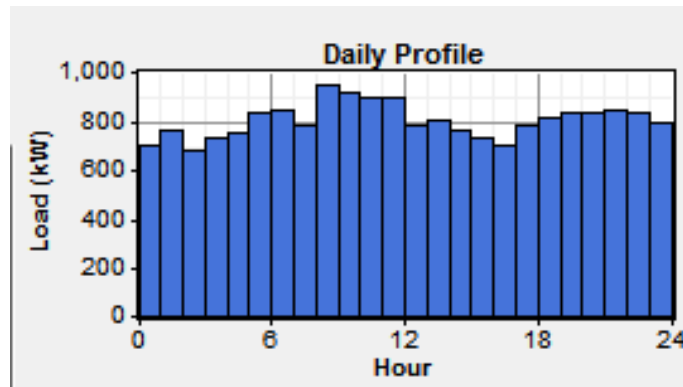


Figure III.14 : le profil journalier de la charge

La distribution journalière est caractérisée par un creux de consommation qui est enregistré entre 2h00 et 8h00 du matin, un pic de consommation atteint le matin entre 8h00 et 12h00 et des valeurs plus au moins constantes dans la soirée de 18h00 à 01h00.

- Ces informations restent très difficiles à exploiter car le profil de consommation est aussi variable selon les saisons.

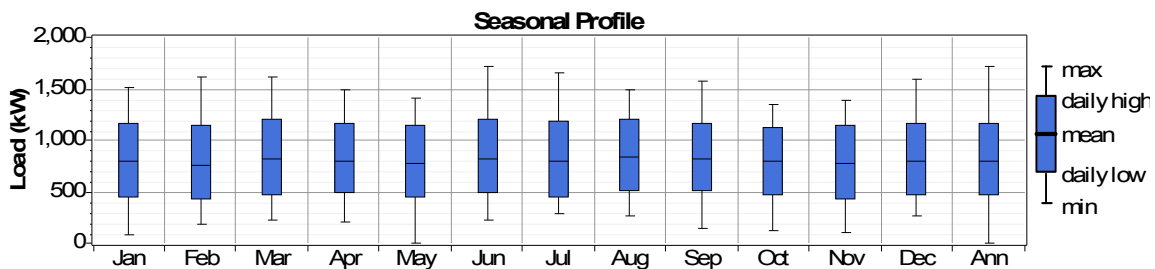


Figure III.15 : la charge horaire de l’hôpital de Thenia

La charge horaire de la l’hôpital de Thenia d’après la simulation Homer ; montre des valeurs estimatives horaires pour des jours types durant chaque mois de l’année, ce qui montre que le pic de consommation est toujours enregistré durant la journée entre 8h00 et 18h00, après avec des valeurs décroissantes (figureIII.16) ; par contre la charge saisonnière est constante pendant l’été comme l’hiver avec très peu de différences non significatives.

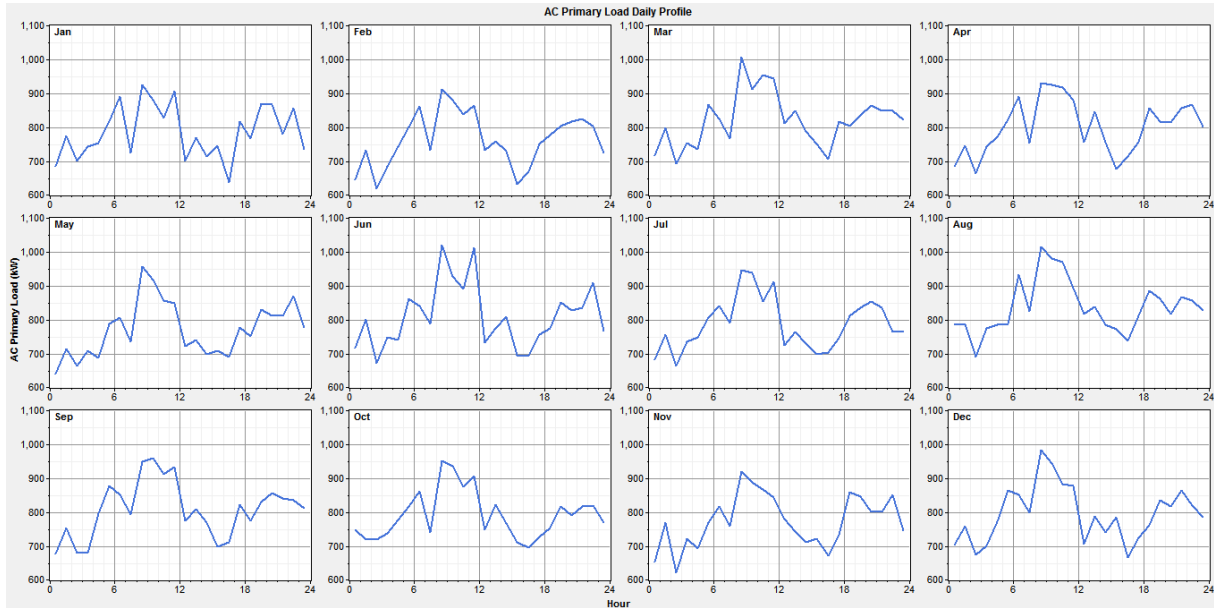


Figure III.16 : la charge horaire de l’hôpital de Thenia

**III.4.Simulation de système hybride**

Pour satisfaire cette charge , nous avons proposé un seul scénario à simuler, tout simplement et nous avons considéré deux cas : avec le générateur existant en faisant varié respectivement l’apport de photovoltaïque et de l’éolien .Tous les systèmes sont raccordés au réseau .

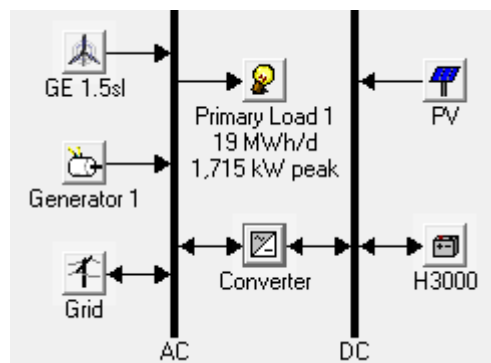


Figure III.17 : Configuration de système

Notre système hybride proposé contient un générateur photovoltaïque ; une éolienne , un générateur diesel convertisseur et un système de stockage en batteries .

**III.4.1.Générateur existant :** Dans ce premier cas, nous avons considéré deux cas à simuler avec le générateur diesel existant qui est d’une puissance de 1000Kw, en proposant d’autres composants qui sont l’éolienne et le photovoltaïque ; en changeant à chaque fois leur apport jusqu’à l’obtention de la solution optimale.

**III.4.2 :Aérogénérateur proposée:** L’aérogénérateur utilisé dans ce projet est de type **GE1,5sl** qui a les caractéristiques présentées sur les tableaux suivants :

Aérogénérateur GE1,5sl	
Puissance nominale	1500 AC
Vitesse de démarrage	4 (m /s)
Vitesse d'arrêt	25 à30 (m /s)
Diamètre du rotor	77 m
Hauteur de moyeu	100 m
Nombre de pâles	3

**Tableau III.5:** Caractéristique de l'aérogénérateur

Vitesse de vent(m/s)	Puissance (kw)
1	0
2	0
3	0
4	0
5	40
6	119
7	228
8	391
9	605
10	865
11	1134
12	1399
13	1500
14	1500
15	1500
16	1500
17	1500
18	1500
19	1500
20	0

**Tableau III.6 :** les vitesse du vent et les puissance de l'aérogénérateur utilisé

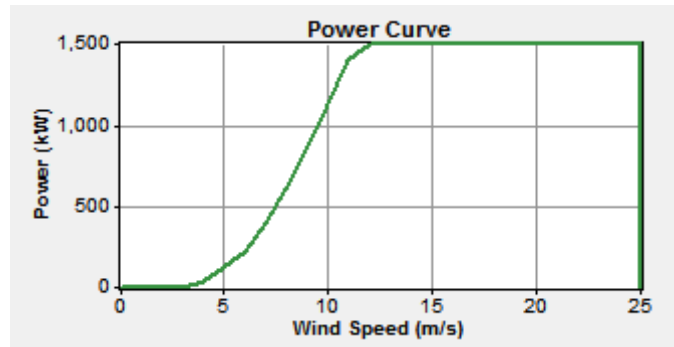


Figure III.18 : propriétés de l'aérogénérateur utilisé.

### III.4.3. Batterie de stockage

Il est possible d'assurer la fourniture de toute l'énergie nécessaire au site directement par les générateurs, cependant, dans le but de minimiser le fonctionnement du générateur Diesel et par suite les émissions des gaz, il est judicieux de rajouter un système de stockage d'énergie. Cela nous permet d'exploiter au maximum les ressources renouvelables disponibles en rechargeant les batteries par ces dernières (éolienne et photovoltaïque). Les caractéristiques des batteries sont données par le tableau ci-dessous :

Spécifications	Valeur
Type de courant délivré	DC
Capacité nominale	3000
Tension nominale	2
Etat de charge initiale permise	30%
Courant de charge max	610A
Taux de charge	1A/Ah
Rendement	86%
Durée de vie minimale	20ans

Tableau III .7: caractéristiques des batteries

### III.4.4. CONVERTISSEURS

Dans les systèmes PV-EOL-GD, les convertisseurs sont utilisés pour transformer le courant continu CC en courant alternatif CA et vice-versa. Les types de convertisseurs souvent rencontrés dans les systèmes hybrides sont : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs

Le tableau représente les caractéristiques techniques des convertisseurs utilisés :

Caractéristiques	Valeur
Durée de vie	15ans
Rendement(DC/AC)	90%
Rendement(AC/DC)	90%

Tableau III.8 :caractéristiques des convertisseurs

**III.5.Les scénarises**

**a)- scénario 1**

Nous avons proposé dans ce scénario, un générateur diesel de 1000Kw, couplé avec un générateur photovoltaïque de 500 KW, 5 éoliennes, un convertisseur de 1000 KW, et 500 batteries de 4V/1900Ah.

Double click on a system below for optimization results.

	PV (kW)	1.5sl	Label (kW)	H3000	Conv. (kW)	Disp. Strgy	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Diesel (L)	Label (hrs)
	500	5	1000	500	1000	CC	1000	\$ 2,448,500	2,525,980	\$ 5,605,973	0.643	0.75	0.00	276,933	944

Figure III.19 : les paramètres des générateurs - scénario 1

**b)-Scénario 2**

En gardant le même groupe diesel et les mêmes batteries , on a essayé d’augmenter la capacité de générateur PV à 800 Kw, et diminuer la capacité de l’éolienne en 3 éoliennes , ceci pour pouvoir augmenter l’apport des énergies renouvelables dans notre système hybride.

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	1.5sl	Label (kW)	H3000	Conv. (kW)	Disp. Strgy	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Diesel (L)	Label (hrs)
	800	3	1000	500	1000	CC	1000	\$ 2,410,000	8,125,361	\$ 12,566,697	1.441	0.60	0.00	220,351	741

Figure III.20 : les paramètres des générateurs - scénario 2

**Nouvelle conception**

Nous avons proposé une nouvelle conception en considérant que le groupe diesel n’existe pas, et c’est à nous de dimensionner.

De ce fait nous avons essayé d’optimiser le système photovoltaïque en considérant une capacité de 1000Kw tout en inversant les mêmes capacités considérées auparavant pour le diesel, en gardant aussi la même capacité de stockage afin d’optimiser l’apport de l’énergie renouvelable ,

ce qui va nous permettre de diminuer la consommation du carburant ainsi que les émissions en gaz polluants.

**c)-Scénario 3**

Double click on a system below for optimization results.

	PV (kW)	1.5sl	Label (kW)	H3000	Conv. (kW)	Disp. Strgy	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Diesel (L)	Label (hrs)
	1000	5	600	500	1000	CC	1000	\$ 2,469,175	8,116,531	\$ 12,614,834	1.447	0.75	0.00	256,351	1,479

**Figure III.21** : les paramètres des générateurs - scénario 3

Nous avons considéré un groupe diesel de 600Kw ; couplé avec 5 éoliennes et un générateur PV de 1000Kw, ainsi capacité de stockage de 500 batteries considérés dans les scénarios précédents.

**d)-Scénario 4**

Pour ce dernier scénario, nous avons considéré un groupe diesel de 800Kw ; couplé avec 3 éoliennes en gardant la même puissance du générateur PV et la même capacité de batteries que le scénario 3.

Double click on a system below for optimization results.

	PV (kW)	1.5sl	Label (kW)	H3000	Conv. (kW)	Disp. Strgy	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Diesel (L)	Label (hrs)
	1000	3	800	500	1000	CC	1000	\$ 2,482,175	6,313,983	\$ 10,374,650	1.190	0.60	0.00	219,452	910

**Figure III.22** : les paramètres des générateurs de scénario 4

**Conclusion**

Après avoir évalué toutes les données de l’installation, nous avons pu définir les puissances nécessaires ainsi que les caractéristiques de tous les éléments de notre installation, Il nous permettrons de simuler plusieurs configuration qui seront traitées dans le chapitre suivant .

# **Chapitre VI**

## **RESULTATS ET DISCUSSION**

---

## Introduction

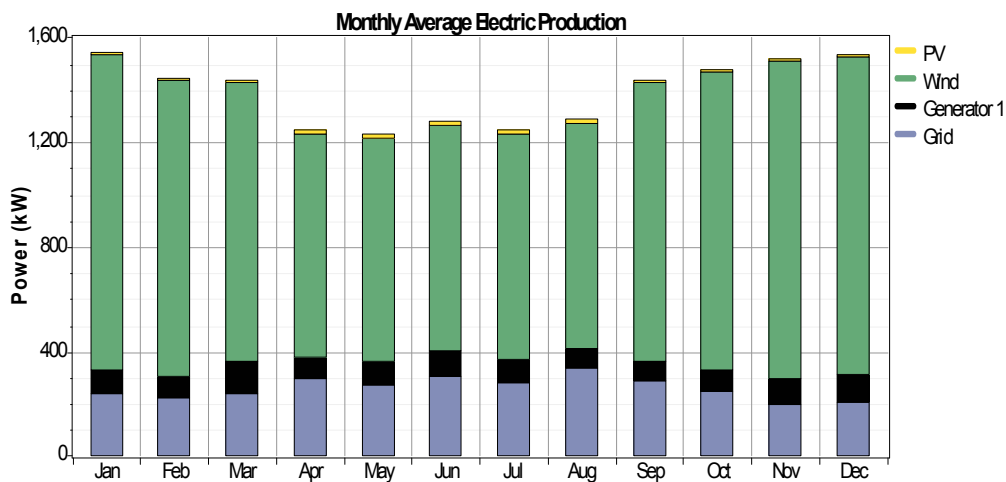
Après la présentation du matériel utilisé, nous passons à la simulation de configuration à l'aide du logiciel HOMER, une configuration sera utilisée avec quatre scénari (deux pour l'existant et deux pour la proposition),

On terminera par une étude comparative entre les résultats obtenus.

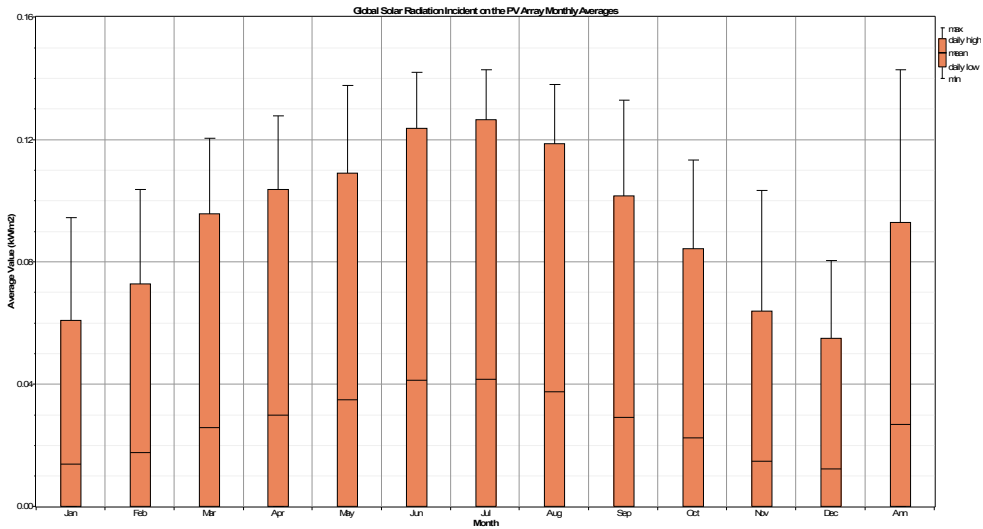
### IV.1.l'existant

#### IV.1.1.Scenario 1

D'après les résultats de simulation obtenus, la part du photovoltaïque n'est pas du tout significative et ne représente que 1% de la production énergétique, par contre celle de l'éolienne représente la plus grande portion du système hybride proposé qui est de 74%. Ce résultat est dû sans doute à la vitesse du vent et sa disponibilité pendant la nuit et pendant les périodes de mauvais temps. Quant au générateur diesel, sa part est tout à fait modeste de l'ordre de 7%.

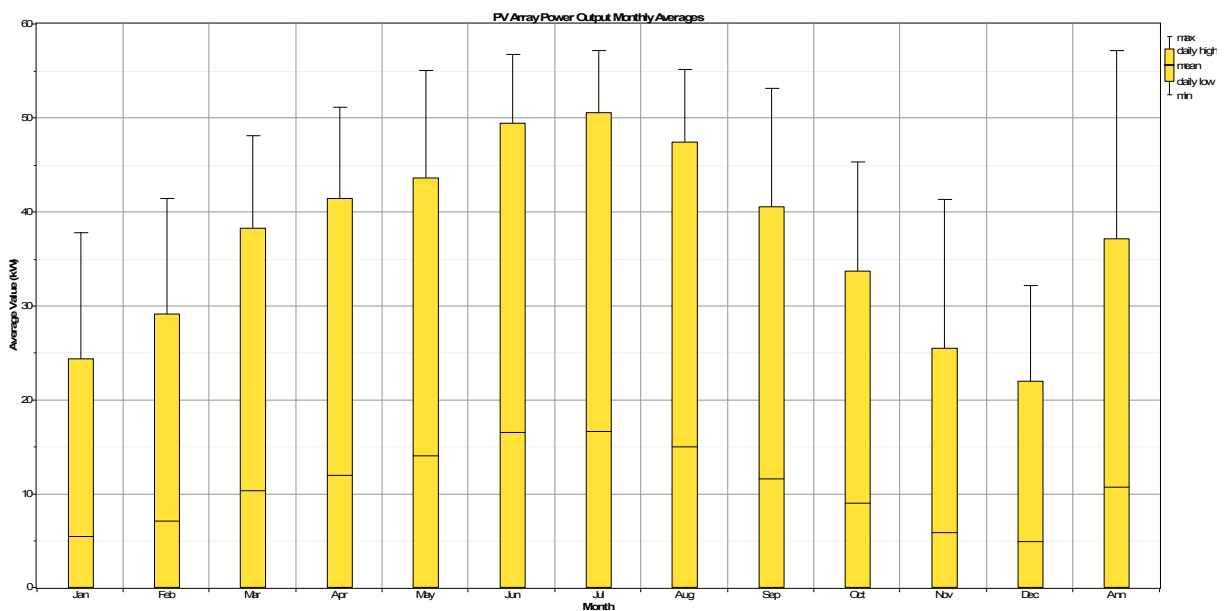


VI.1 : l'évaluation de la production électrique du scénario 1.



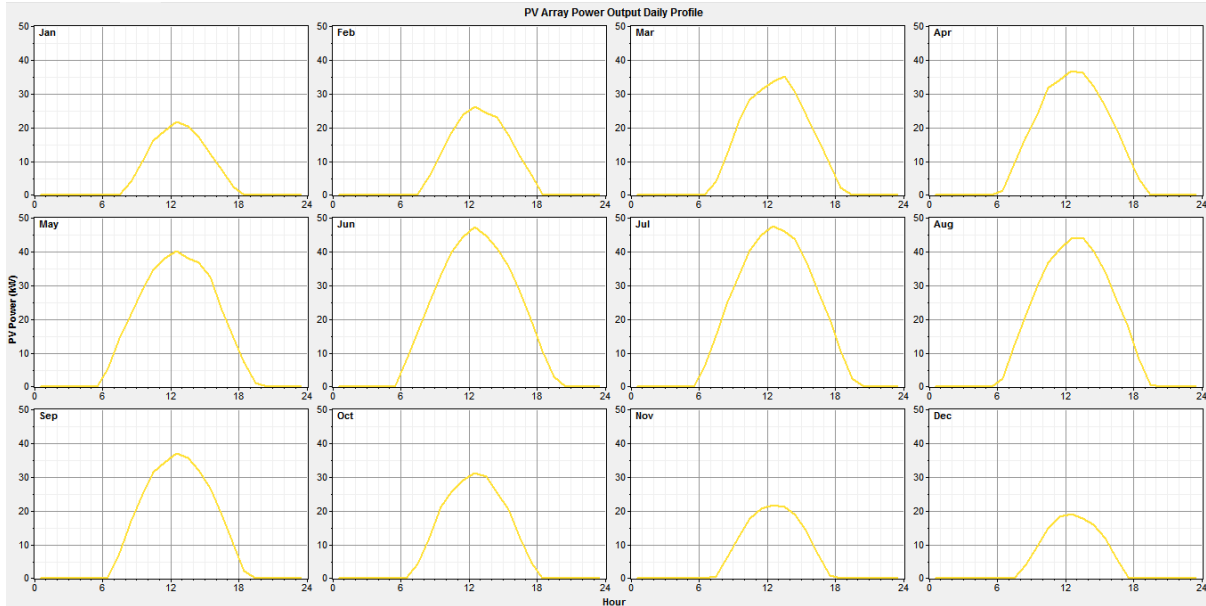
VI.2 : Le rayonnement global incident sur le système PV

Ce résultat est du à la production du générateur PV non atteinte à sa puissance maximale, en raison du rayonnement solaire non suffisant comme illustré dans la figure ci-dessus VI.2 qui montre que le rayonnement incident dans ce cas ne peut pas dépasser la valeur de  $125\text{w/m}^2$  pendant les mois de juin et juillet. Des valeurs très basses sont enregistrées pendant les autres mois arrivant à atteindre  $60\text{w/m}^2$  en décembre ; ceci montre que la production de système photovoltaïque est très basse, car la puissance crête est atteinte avec un rayonnement solaire égale à  $1000\text{w/m}^2$ . Dans notre cas, cette valeur ne peut en aucun cas être atteinte, ce qui justifie la baisse de la production.



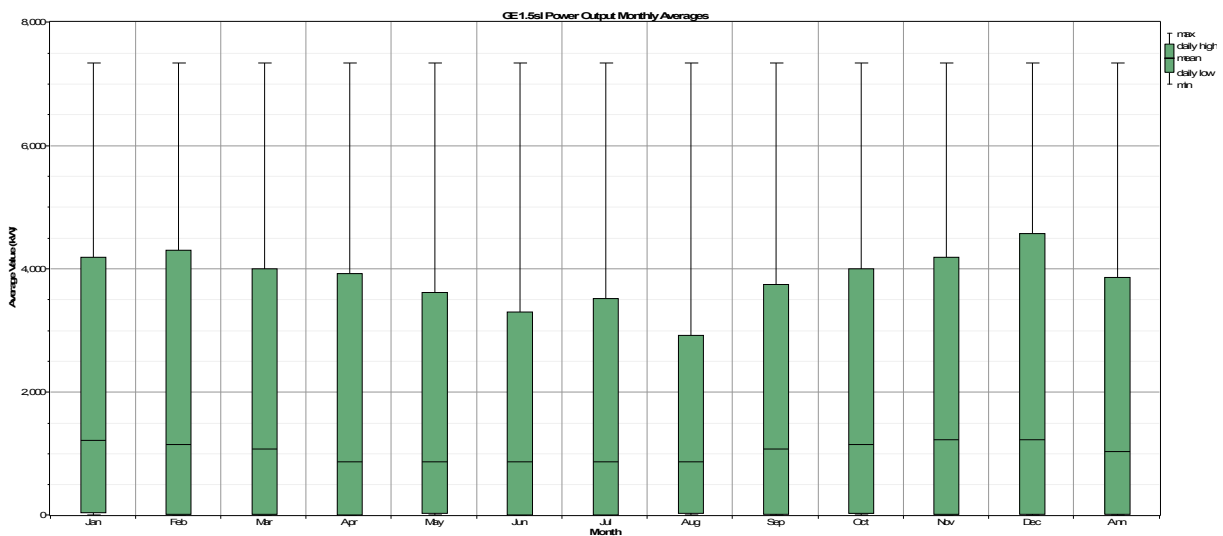
IV.3. Production électrique mensuelle de photovoltaïque de scénario 1

On remarque d’après la figure VI.3 que le générateur PV a pu développé comme valeur maximale 50 kw atteinte au mois de juin et juillet ce qui représente que 10% par rapport à 500kW proposé en photovoltaïque .Les valeurs minimales de 22 kw sont atteintes au mois en décembre , d’où une valeur moyenne de 37 kW . En conséquence, notre système photovoltaïque n’a pas pu développé une puissance importante à cause du rayonnement solaire insuffisant dans le site choisi.



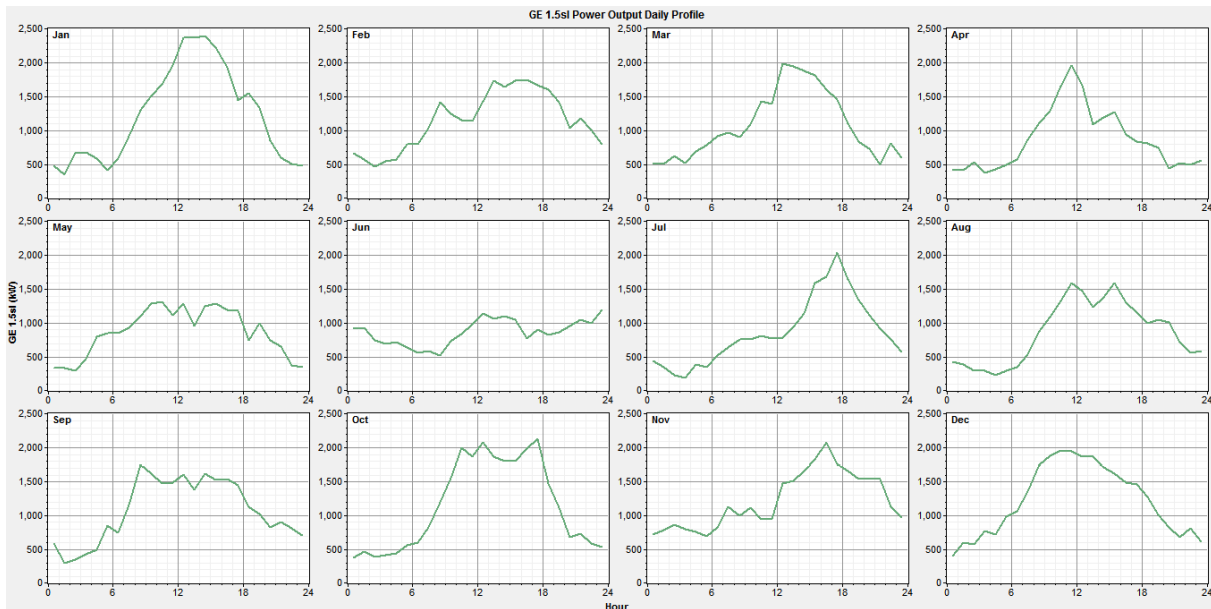
VI.4 : production photovoltaïque horaire de scénario 1

On observe d’après la figure VI.4 le générateur photovoltaïque ne développe pas d’énergie durant la nuit , et que l’optimum de puissance est développée à midi , avec des valeurs de 30 à 50 kw pendant le printemps et l’été ; et la valeur entre 20 et 0 kw en période hivernale.



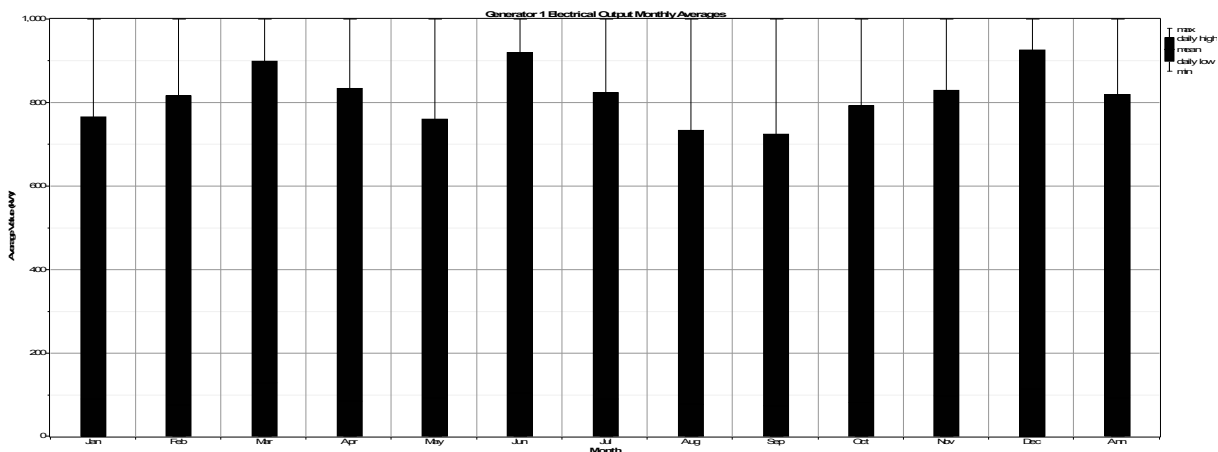
IV. 5: la production électrique mensuelle de l’éolienne

La puissance développée par le générateur éolien peut atteindre 4600 Kw pendant le mois de décembre comme valeur maximale, et la valeur minimale de 2900 kw développée durant le mois d'aout ce qui justifie la compensation de l'énergie produite par le système photovoltaïque tout en ayant même un excès de production qui est injecté au réseau.



IV.6: production électrique horaire de l'éolienne

On remarque que l'éolienne peut produire durant la nuit un minimum de 500kw, et jusqu'à 2000 kw pendant le jour ; ce qui explique que le générateur diesel atteint des valeurs très basses.



VI.7: production électrique du générateur du scénario 1.

On remarque d'après la figure précédente que le groupe diesel considéré de 1000KW, ne développe que 920 kw pendant le mois de juin et 650 kw en période estivale.

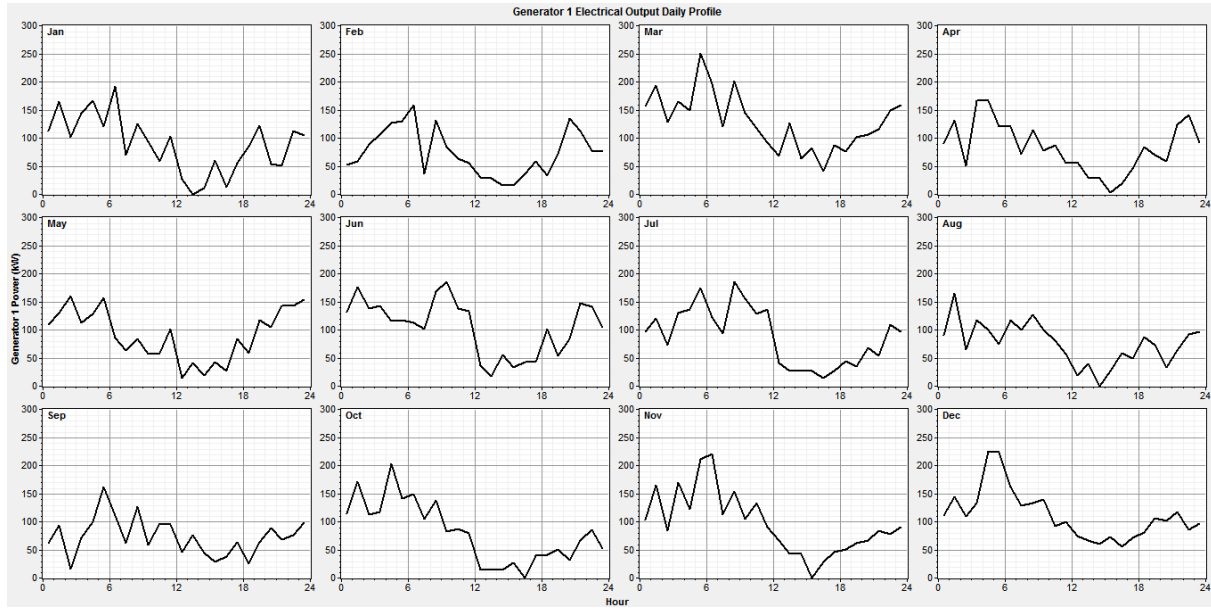
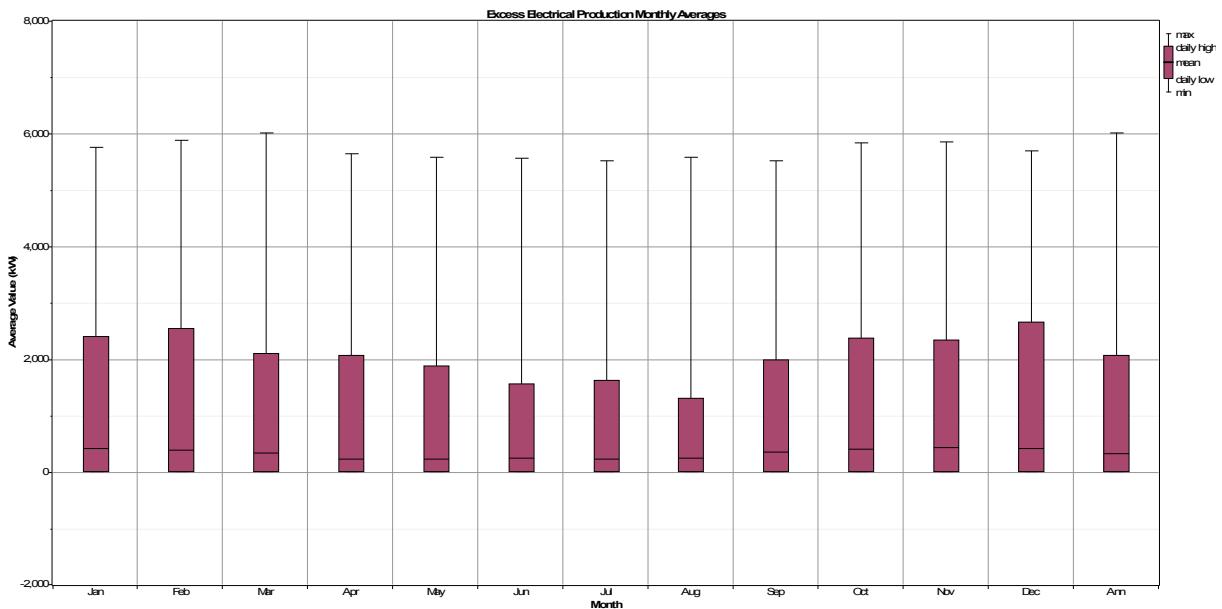


Figure IV.8: production horaire de generateur

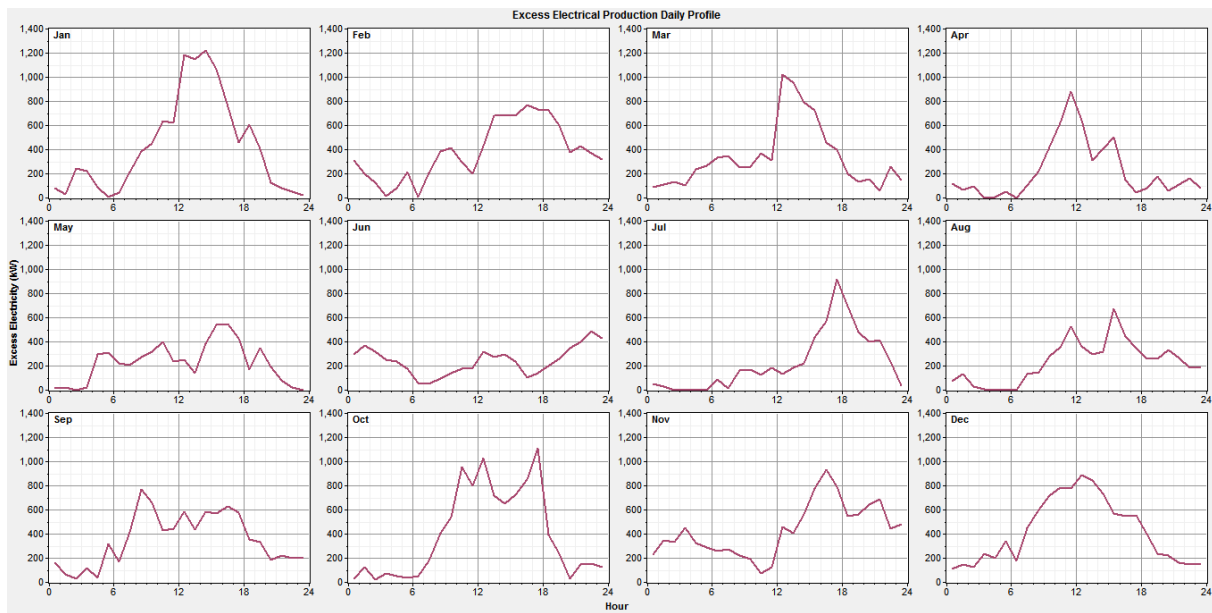
On déduit d'après les valeurs horaires que le groupe diesel développe des puissances optimales ne dépassant pas 200 kw pendant la nuit , et des valeurs inférieures à 50 kw atteignant même des valeurs nulles pendant les journées d'hiver ; périodes où l'énergie éolienne est optimale selon les valeurs horaires de l'éolienne.



VI.9 : Excess électrique mensuelle

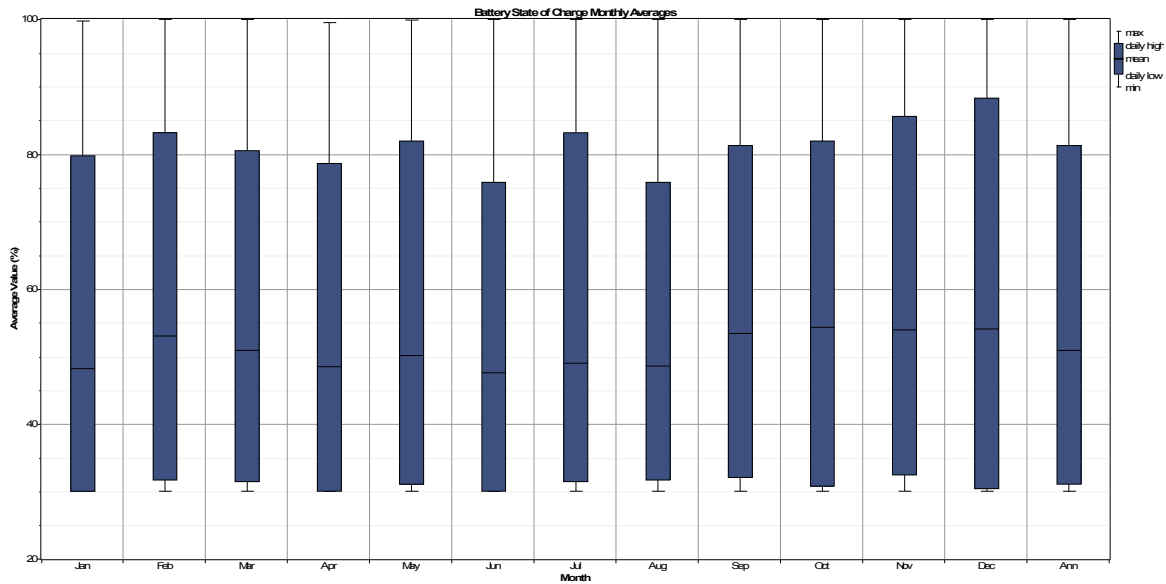
On enregistre aussi un excès de production électrique plus important pendant les mois d'hiver ; par ordre décroissant de décembre à février, janvier puis octobre et novembre, pouvant atteindre 2700 kw comme valeur maximale ; cet l'excès est moins important pendant les mois d'été atteignant 1200 kw

pendant le mois d'aout, ce qui nous incite à affirmer que le photovoltaïque n'est nullement responsable de cet excès.



VI.10 :Excess électrique horaire.

Tandis que les valeurs horaires prouvent que l'allure de l'excès suit l'allure de la production éolienne.



VI.11 :La charge mensuelle de la batterie

D'après la figure précédente, on constate que les batteries sont toujours à un état supérieur à 75% allant jusqu'à 83% ce qui leur assure une longue durée de vie , ainsi que la disponibilité en énergie.

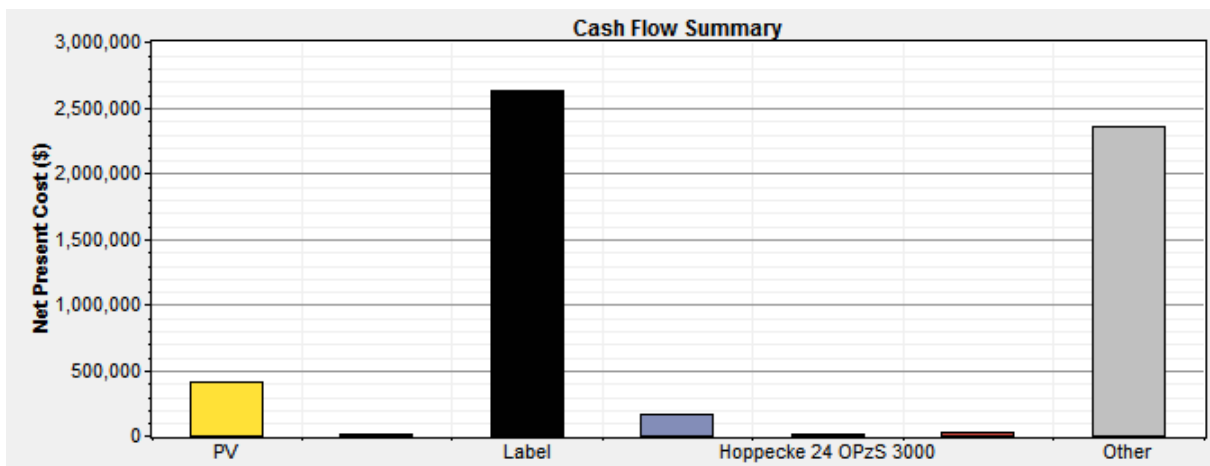
**VI.1.1.1 le Coût du système**

Les couts des différents générateurs d'énergie, ainsi que ceux des batteries et des convertisseurs, sont illustrés dans le tableau suivant :

composant	capital\$/an)	remplacement (\$/an)	O&M (\$/an)	fuel (\$/an)	récupération (\$/an)	totale (\$/an)
<b>PV</b>	400000	0	10625	0	0	410625
<b>GE1.5sl</b>	6500	1	537	0	0	7038
<b>GD</b>	25000	2	2359999	242316	0	2627317
<b>CONVERTISSEUR</b>	30000	4	750	0	0	30754
<b>BATTERIE</b>	7000	513	750	0	0	30754
<b>Système</b>	2448500	521	2914637	242316	0	5605972

**Tableau I.1** : Cout des différents composants de système

L'histogramme suivant représente la répartition des couts pour les différents composants du système :



**Figure VI.12** : répartition du cout du système.

LA répartition des couts des différents composants du système est comme suit :

Le photovoltaïque représente un cout de 40000\$, le générateur diesel 25000\$, L' éolien 6500 \$, les batteries avec un cout de 7000 \$ et enfin le convertisseur avec un cout minimal de 30000\$.

Ce qui donne un cout total de l'installation de 2448500 \$.

#### VI.1.1.2. Production électrique

Production	Quantité (KWh/an)	Taux(%)	Energie (kWh/an)	Excès d'électricité	Prix spécifique(\$/kwh)	Renouvelable
PV	93.661	1	28	23.4	0,64	74 %
GE1.5sl	9013.405	74	55.829			
GD	805.757	7				

**Tableau VI.2 :** Résultat - scénario 1

On remarque que la majeure partie de la production électrique de notre système est couverte à 74% par les éoliennes. La part du photovoltaïque n'est pas significative 1%, tandis que le générateur diesel participe avec un taux de 7%, ce qui donne des pertes de l'ordre de 23.4%. avec un cout spécifique de l'énergie de 1,441 \$ /KWh, et l'énergie totale annuelle produite est de 8.65 Kwh/an.

On constate que les pertes ne sont pas trop élevées et que la production électrique est basée sur la source de vent.

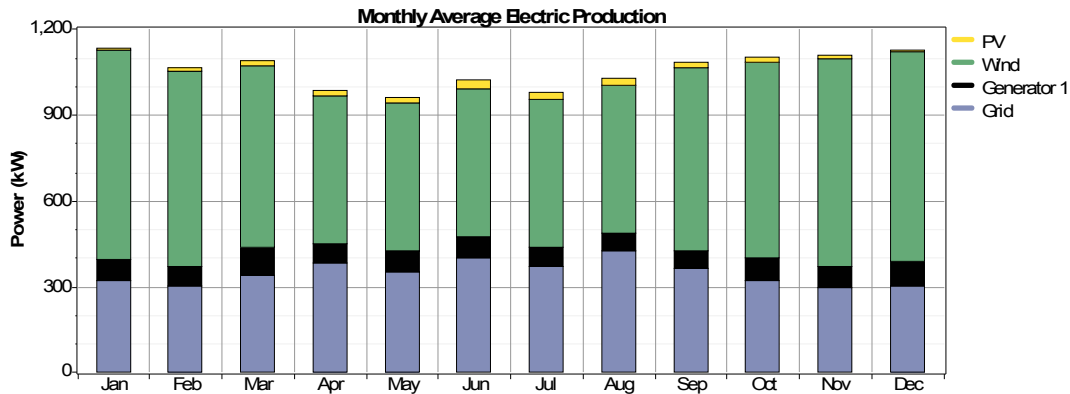
#### VI.1.1.3. les émissions

CO <sub>2</sub> (kg /an)	CO (kg/an)	SO <sub>2</sub> (kg/an)	NOx (kg/an)
979083	80860	2548	16592

**Tableau VI.3.** les émissions des gaz à effet de serre.

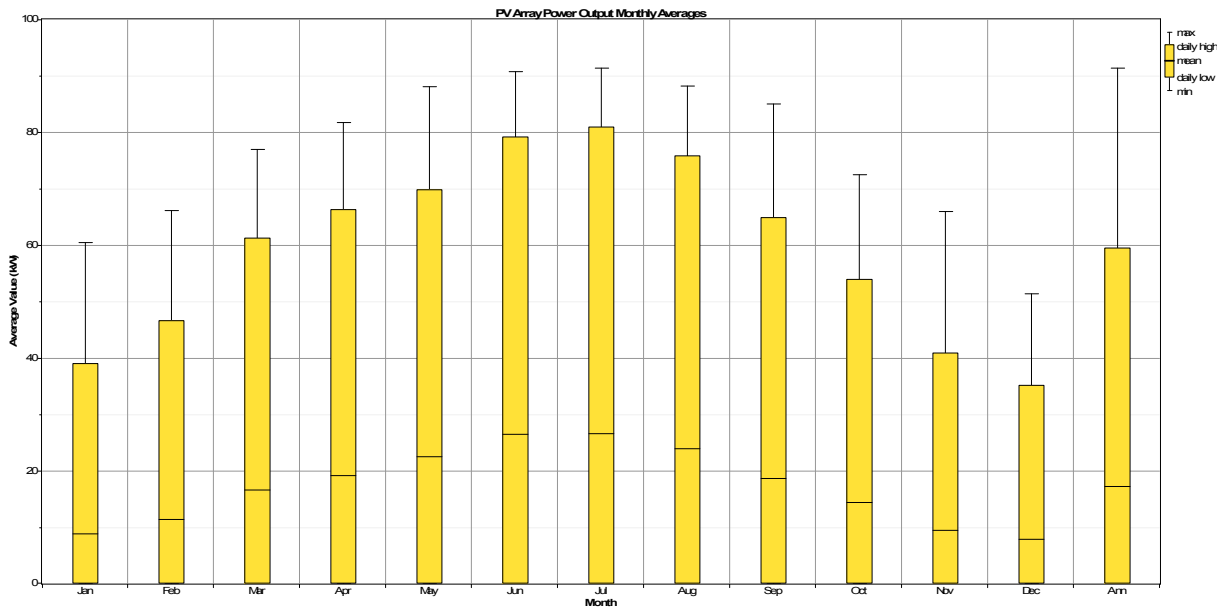
D'après le tableau ci-dessus, on constate que les émissions des gaz à effet de serre de notre système sont acceptables environ 979083 kg /an pour le CO<sub>2</sub>, 80860 kg/an pour le CO, ces taux des émissions sont causés par les rejets du générateur Diesel en consommant du fuel.

VI.1.2.Scénario 2



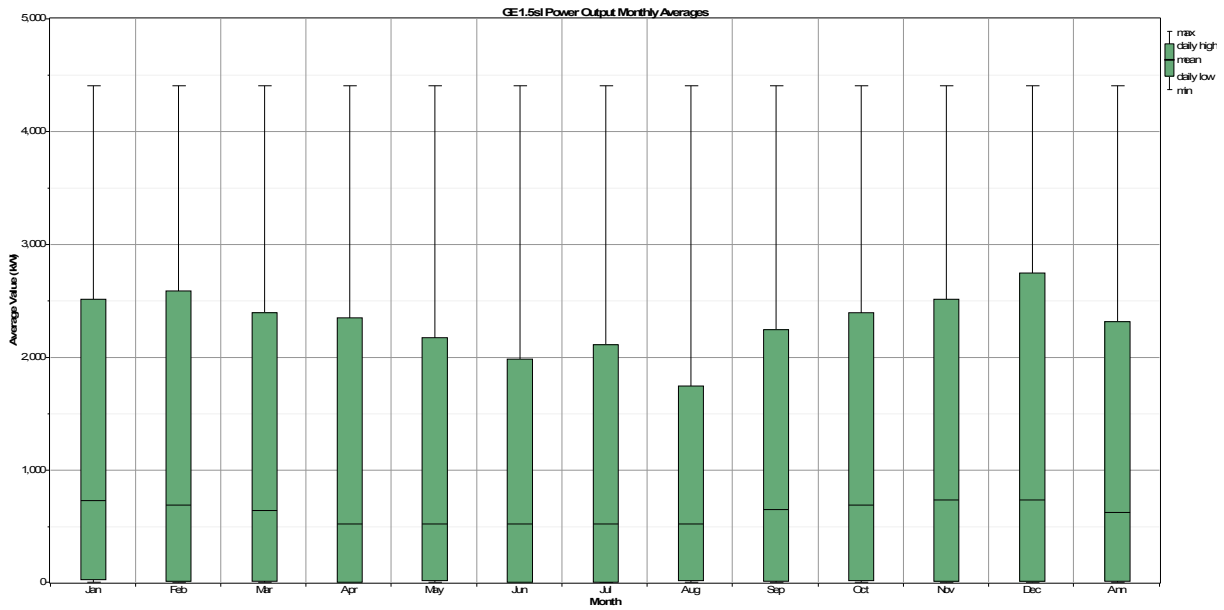
VI.13 : l'évaluation de la production électrique du scénario 2.

Dans le scénario 2, nous avons diminué le nombre d'éolienne de 5 à 3, et nous avons augmenté la puissance du générateur photovoltaïque de 500 à 800 kw ; pour voir si la taux de l'apport énergétique photovoltaïque va augmenter ou pas. Nous avons observé une augmentation du taux de 1% seulement , ce qui fait déduire que c'est l'éolienne qui a donné le taux le plus important dans notre système hybride.



IV.14. production électrique mensuelle de photovoltaïque du scénario 2

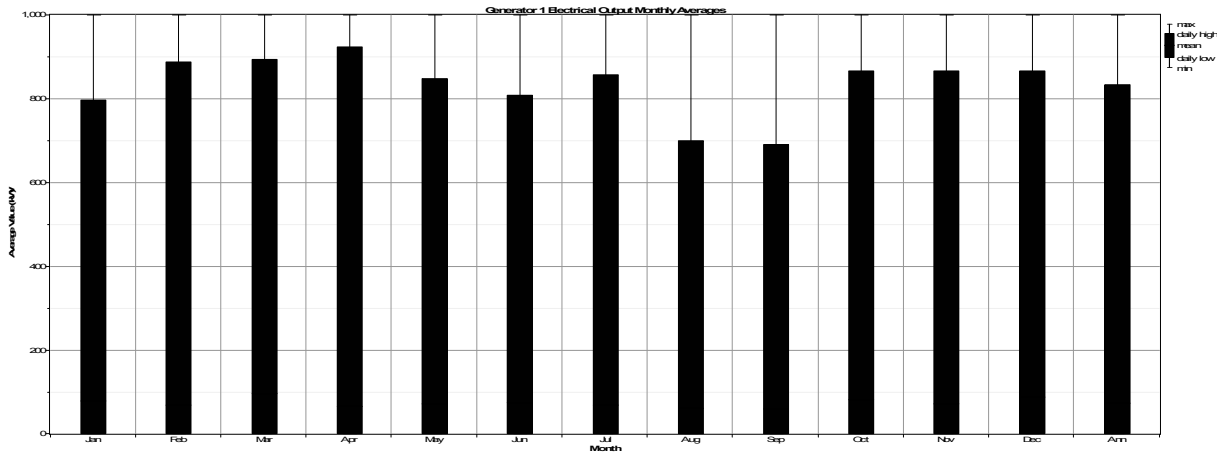
Notre nouveau générateur photovoltaïque est évalué à 800kw , mais les valeurs les plus importantes ne dépassent pas 80kw, ce qui prouve que notre générateur solaire dans les conditions du site de Thenia ne peut développer que 10 % de sa puissance nominale.



IV.15 : la production électrique mensuelle du scénario 2

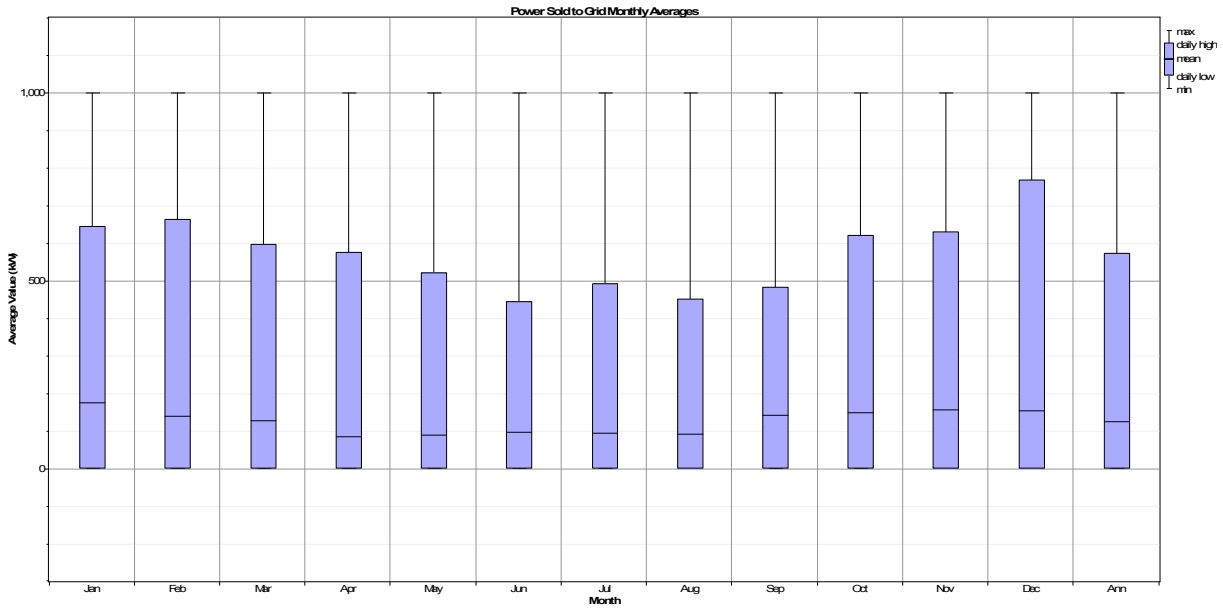
Les valeurs mensuelles de l'énergie développée par le générateur éolien sont plus importantes durant les mois de l'hiver au moment où le photovoltaïque développe son minimum .

La puissance produite par le générateur éolien peut atteindre 2700 kw comme valeur maximale développée et un minimum de 1700 kW durant le mois d'Aout.



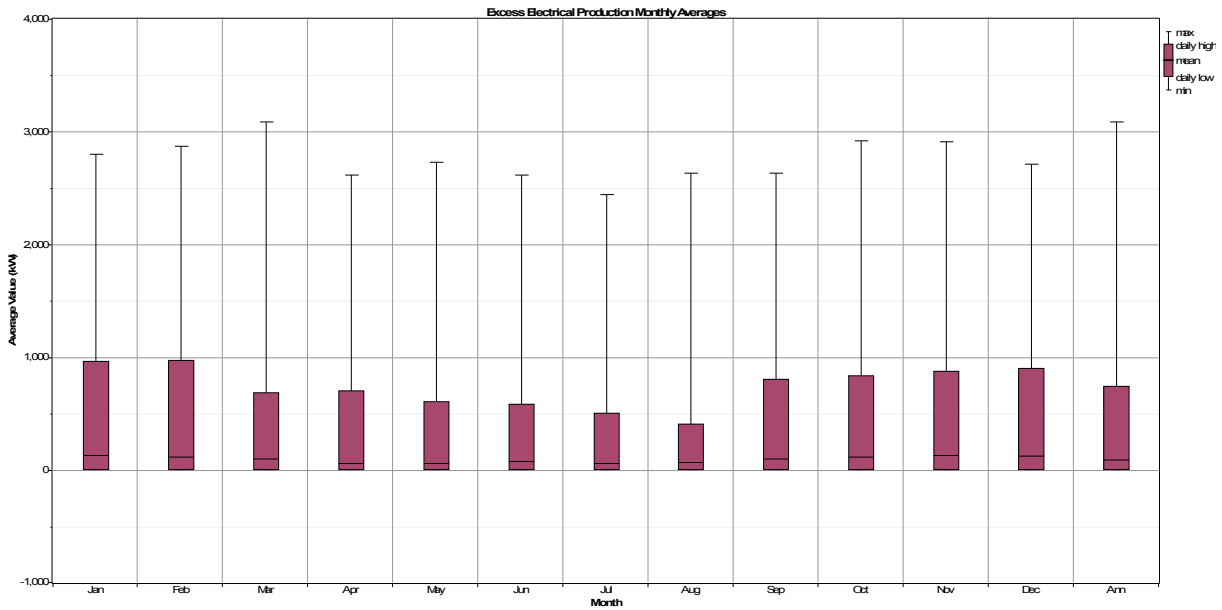
IV.16. Protection mensuelle de groupe diesel

On remarque d'après la figure IV.15 que notre groupe électrogène produit un maximum de 920 kw pendant le mois d'avril , et un minimum pendant le mois de septembre et aout , ce qui traduit le comportement du groupe électrogène diesel , qui est un moteur thermique de combustion et qui nécessite une puissance de démarrage qui ne peut pas être moins de 45% de sa puissance nominale.



**IV.17.** la puissance injectée au réseau

Nous avons limité la vente au réseau à 1000 kw , après avoir chargé les batteries et satisfait la charge à consommer,le surplus de la production énergétique des trois systèmes reste comme excès.



**IV.18:** Excès mensuelle de la production électrique .

L'excès de production enregistré pour ce scénario correspond à l'excès de l'éolienne et du groupe diesel, après avoir satisfait toutes les charges à consommer, charger les batteries , et la vente maximum au réseau. Le maximum d'excès est enregistré pendant le mois de janvier où nous avons enregistré un maximum pour la production éolienne.

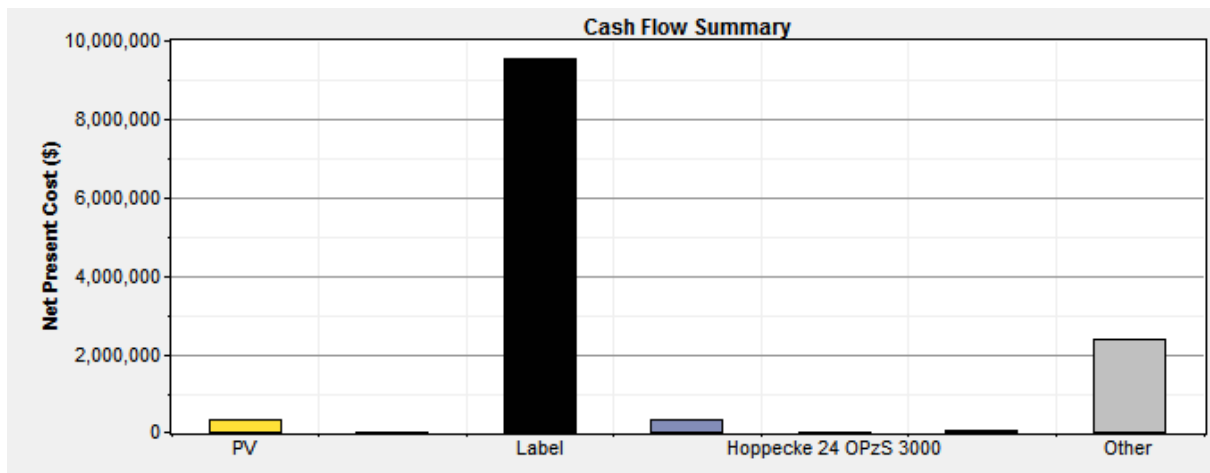
**VI.1.2. Le coût du système**

Les coûts des différents générateurs d'énergie, ainsi que ceux des batteries et des convertisseurs, sont illustrés dans le tableau suivant :

Composant	capital\$/an	remplacement (\$/an)	O&M (\$/an)	fuel (\$/an)	récupération (\$/an)	Total (\$/an)
PV	300000	0	9250	0	0	309250
GE1.5sl	6000	1	625	0	0	6626
GD	90000	1	9262497	192807	0	9545304
CONVERTISSEUR	30000	4	750	0	0	30754
BATTERIE	4000	144	625	0	0	4769
Systeme	2410000	150	9963743	192807	0	12566699

**Figure VI.4** : cout des différents composants de système.

L'histogramme suivant représente la répartition des coûts pour les différents composants du système :



**Figure VI.19** : Répartition du coût du système.

## VI.1.2.2.la production électrique

Production	Quantité (KWh/an)	Taux(%)	Energie consommé (KWh/an)	Excès d'électricité(%)	prix spécifique (\$/kWh)	Renouvelable %
PV	93 .661	2	800 .079	8.65	1,441	60%
GE1.5sl	9013.405	58				
GD	805.757	7				

VI.5 : Production électrique scénario 2

On remarque que la majeure partie de la production électrique de notre système est couverte à 74% par les éoliennes, et les panneaux photovoltaïques 1%, tandis que le générateur diesel participe avec un de 7%, ce qui donne des pertes de l'ordre de 23.4%. Avec un cout spécifique de l'énergie 1,441 \$ /kWh, et l'énergie totale annuelle produite est 800.079 KWh/an.

On constate que les pertes ne sont pas trop élevées et que la production électrique est basée sur la source de vent.

## VI.1.2.2.les émissions

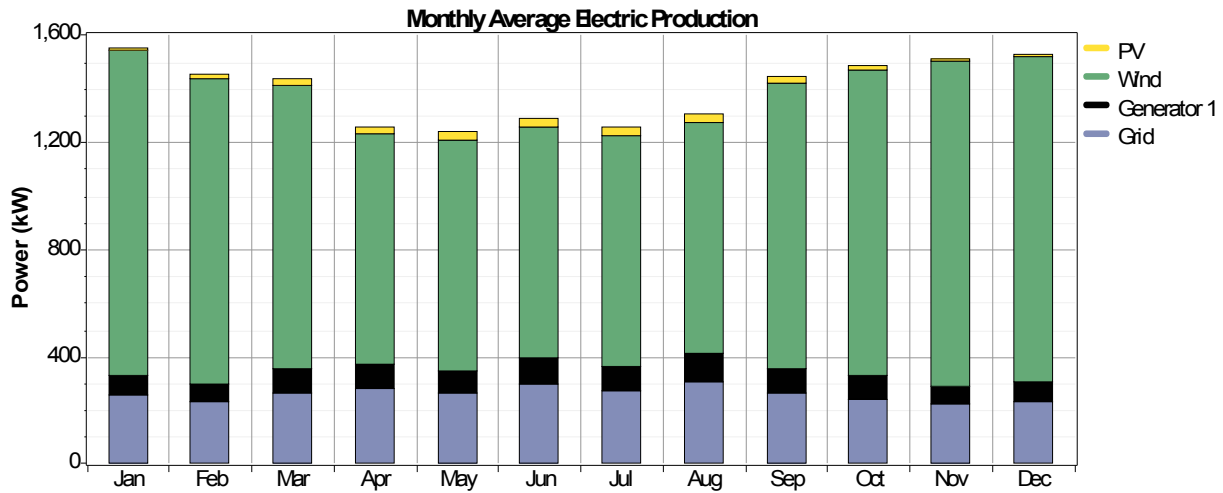
CO <sub>2</sub> (kg /an)	CO (kg/an)	SO <sub>2</sub> (kg/an)	NOX (kg/an)
1817183	392865	6528	15403

Tableau VI.6: les émissions des gaz à effet de serre.

D'après le tableau ci-dessus, on constate que les émissions des gaz à effet de serre de notre système sont acceptables environ 1817183kg /an pour le CO<sub>2</sub>, 392865kg /an pour le CO, ces taux des émissions sont causés par les rejets du générateur Diesel en consommant du fuel.

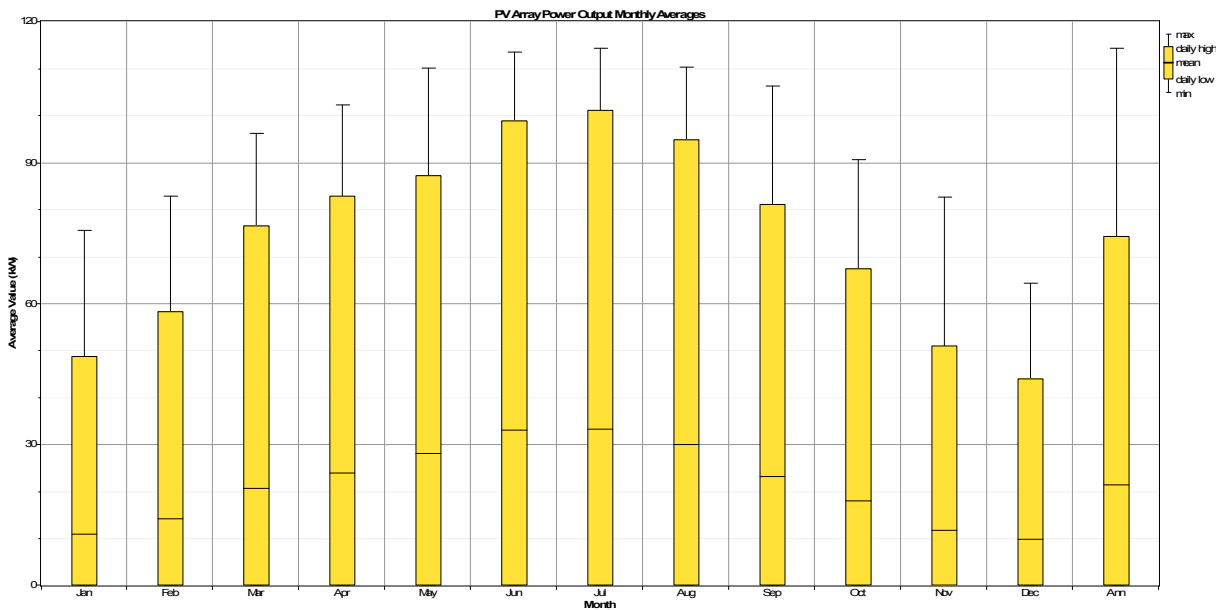
### IV.2. Nos propositions

#### IV.2.1.Scénario 3



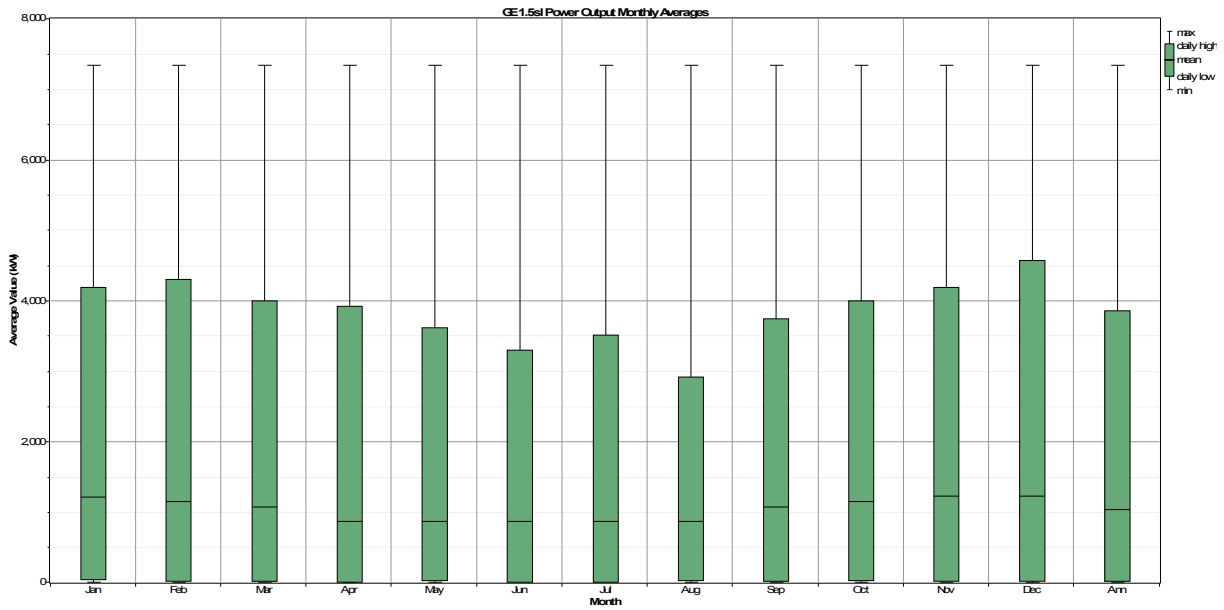
IV.20 : l'évaluation de la production électrique du scénario 3.

Pour ce scénario, nous préconisons un générateur diesel de 600kw en vue de diminuer la consommation en fuel, un générateur photovoltaïque de 1000 kW et 5 éoliennes seront nécessaires pour assurer notre charge. Il en résulte que l'apport des énergies renouvelables n'a pas été amélioré.



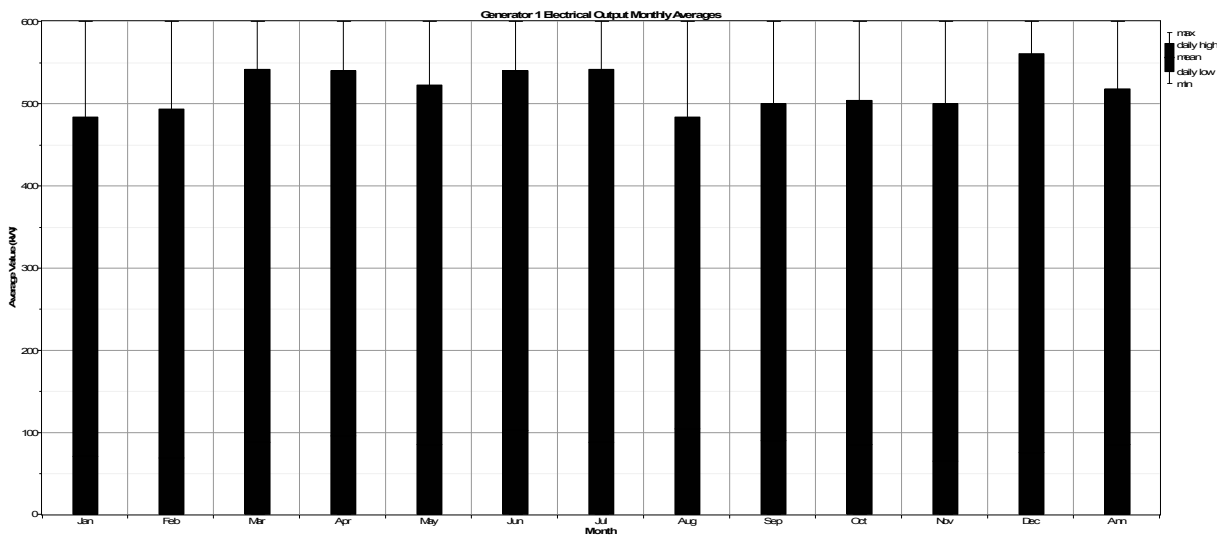
IV.21 :production électrique mensuelle de photovoltaïque de scénario 3.

Notre générateur photovoltaïque atteint toujours 10% de sa puissance nominale, comme valeur maximale, et dans ce cas, un minimum de 45 kw est atteint le mois de décembre, et un maximum de 100 kw au mois de juillet.



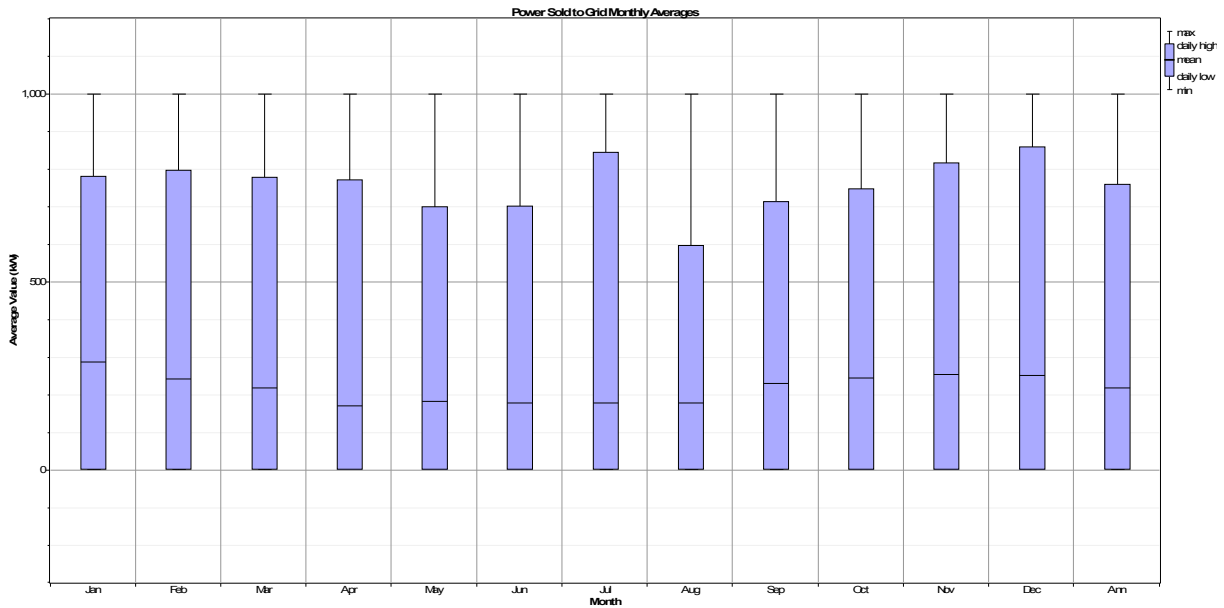
IV.22 : la production électrique mensuelle de l'éolienne - scénario 3.

Considérant 5 éoliennes comme aérogénérateurs, pouvant développer jusqu'à 4500 kw pendant le mois de décembre , et un minimum de 2900kw pendant le mois d'aout, le taux de l'énergie éolienne s'est amélioré dans ce système hybride.



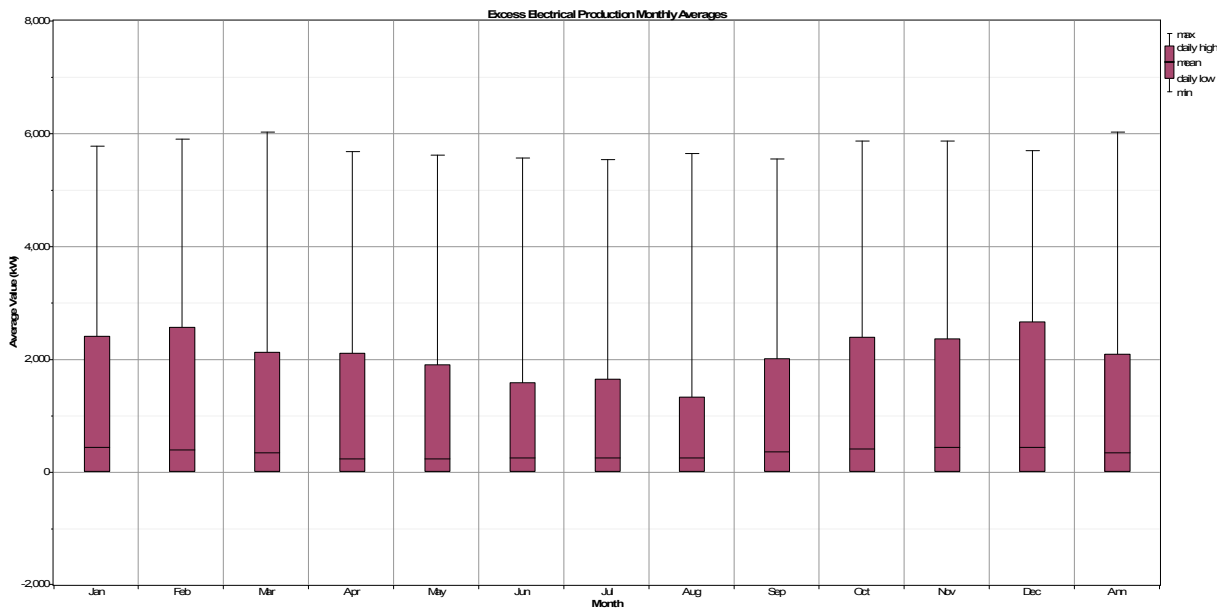
IV.23 :Excès électrique de batterie mensuelle.

Notre générateur diesel continue a fonctionné presque à plein charge , une valeur minimale de 480kw jusqu'à 560kw.



IV.24 : la puissance injectée au réseau.

Une vente au réseau de 850kw comme maximum est atteint pendant le mois de juillet et un minimum de 600kw pendant le mois d’aout.



IV.25 :Excès mensuel de production électrique.

L’excès de production atteint une valeur de 1500kw comme valeur minimale pendant le mois d’aout, et un maximum de 2500kw pendant le mois de décembre.

VI.2.1.1.cout du système

Les couts des différents générateurs d’énergie, ainsi que ceux de la batterie et des convertisseurs, sont illustrés dans le tableau suivant :

composant	Capital \$	remplacement \$	O&M (\$/an)	fuel (\$/an)	récupération (\$/an)	total (\$/an)
PV	400000	0	10625	0	0	410625
GE1.5sl	7800	1	675	0	0	8476
GD	47000	121	8873996	224307	0	9145425
Convertisseur	30000	4	750	0	0	30754
Batterie	4375	292	469	0	0	5136
Systeme	2469175	419	9920936	224307	0	12614835

Tableau VI.7: cout des différents composants de système

L’histogramme suivant représente la répartition des couts pour les différents composants du système :

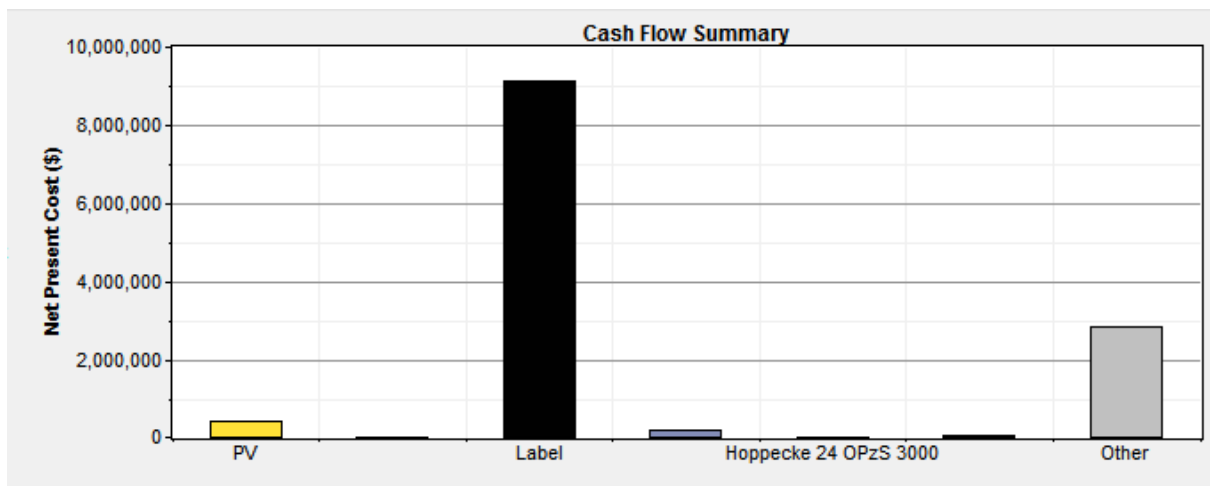


Figure VI.26 : Répartition du cout de système.

VI.2.1.2. Production électrique

Production	Quantité KWh/an	Faux(%)	Energie consommée (KWh/an)	Excès d’électricité(%)	Prix spécifique (\$/KWh)	Renouvelable %
PV	93.661	2	2855.502	23.6	1,447	75%
GE1.5sl	9013.405	74				
GD	805.757	6				

Tableau VI.8: Production électrique - scénario 3.

on remarque que la production électrique de notre système est couverte à 75% par les éoliennes, et les panneaux photovoltaïques sont insignifiants 2%, tandis que le générateur diesel participe avec un taux de 6%, ce qui donne des pertes de l'ordre de 23.6%. Avec un coût spécifique de l'énergie 1,1447 \$ /kWh, et l'énergie totale annuelle produite est 2855.502 KWh/an.

On constate que les pertes ne sont pas trop élevées et que la production électrique est basée sur la source de vent.

**VI.2.1.3. Les émissions**

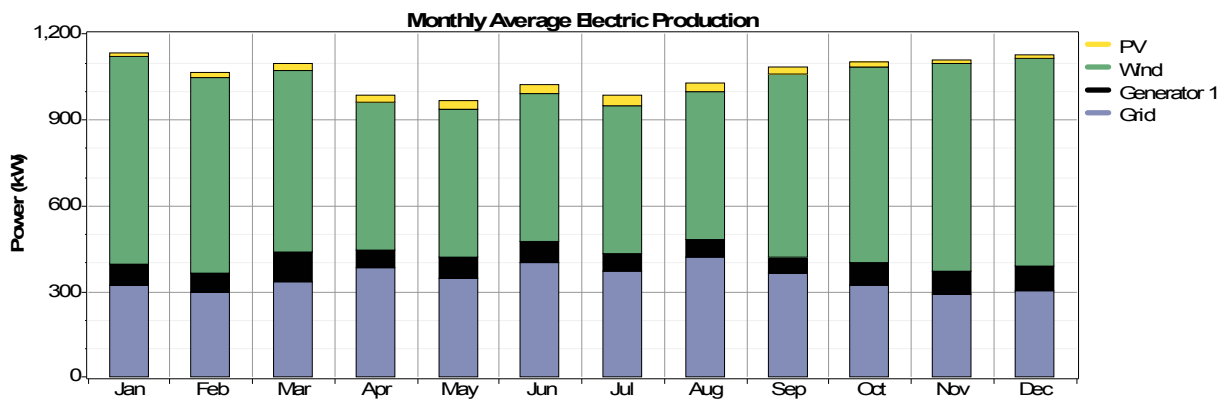
CO <sub>2</sub> (kg /an)	CO (kg/an)	SO <sub>2</sub> (kg/an)	NOx(kg/an)
911373	76450	2380	15369

**Tableau VI.9 :** les émissions des gaz à effet de serre.

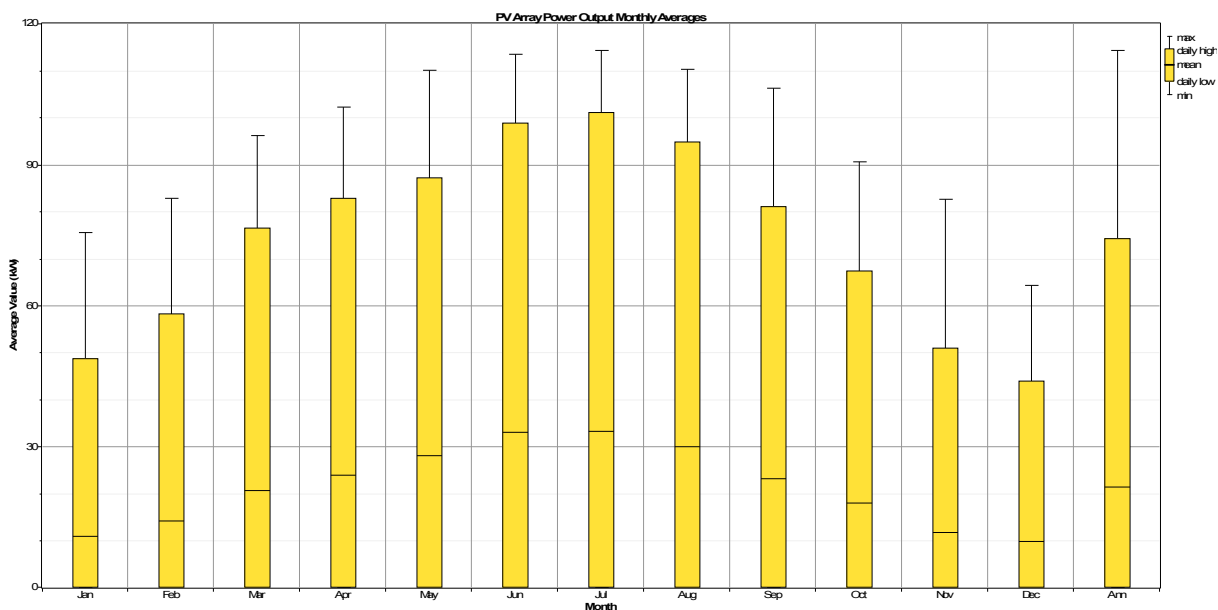
d'après le tableau ci-dessus, on constate que les émissions des gaz à effet de serre de notre système sont acceptables environ 911373 kg /an pour le CO<sub>2</sub>, 76450 kg/an pour le CO, ces taux des émissions sont causés par le rejet du générateur Diesel en consommant du fuel.

**VI.2.1.Scénario 4**

Pour le dernier scénario nous avons diminué le nombre d'éolienne de 5 à 3, par contre nous avons augmenté la puissance du groupe diesel jusqu'à 800kw, tout en gardant le photovoltaïque à 1000kw comme précédemment.

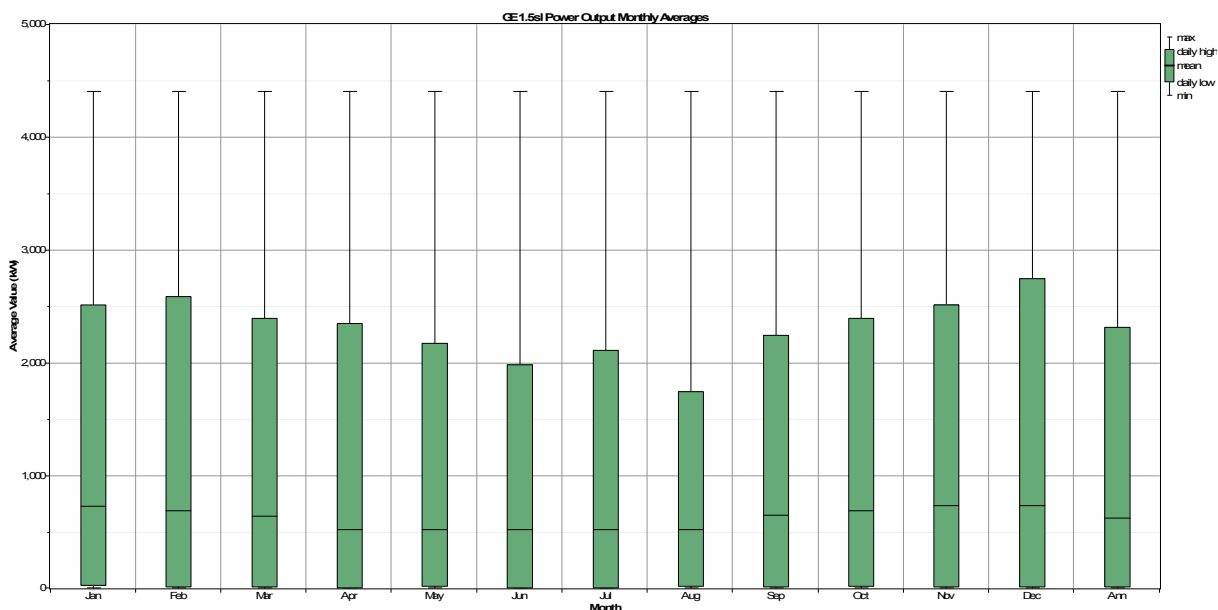


**IV.27 :** l'évaluation de la production électrique du scénario 4.



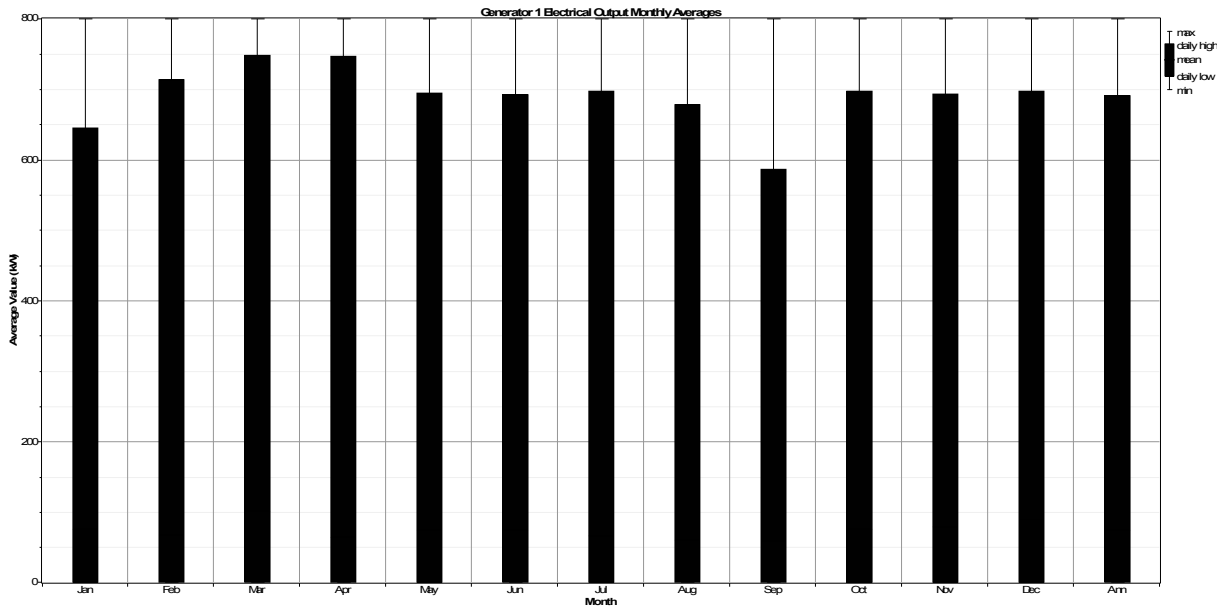
IV.28 : production électrique mensuelle de photovoltaïque - scénario 4

Notre générateur photovoltaïque produit la même capacité que celle du scénario 3.



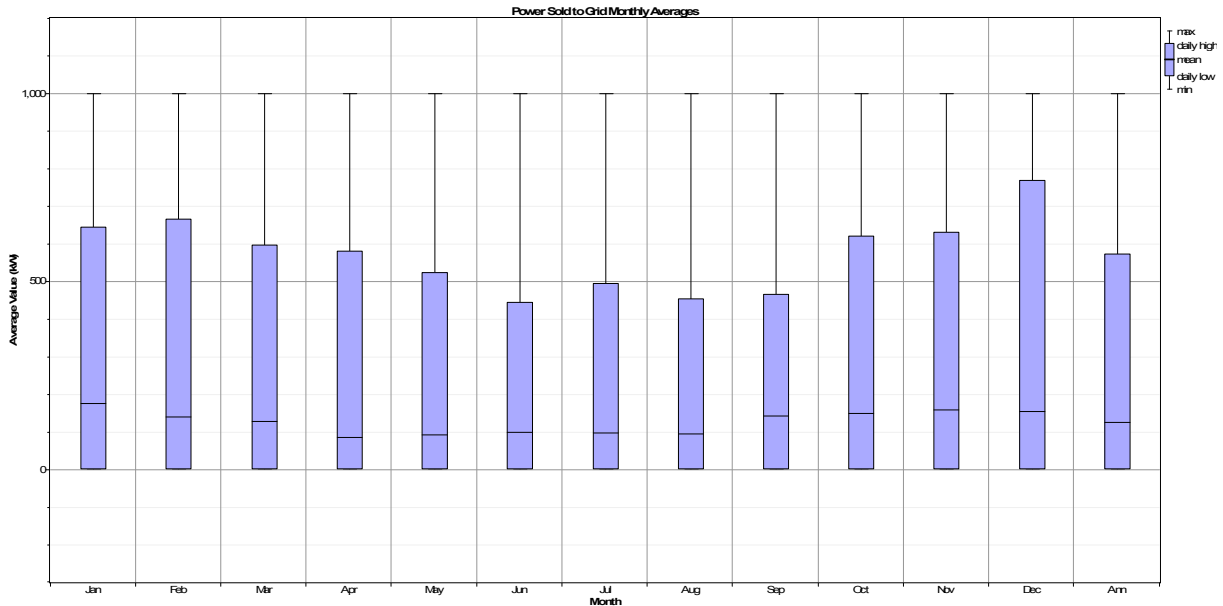
IV.29 : production électrique de leolienne

La production de l'éolienne reste identique à celle du scénario 3.



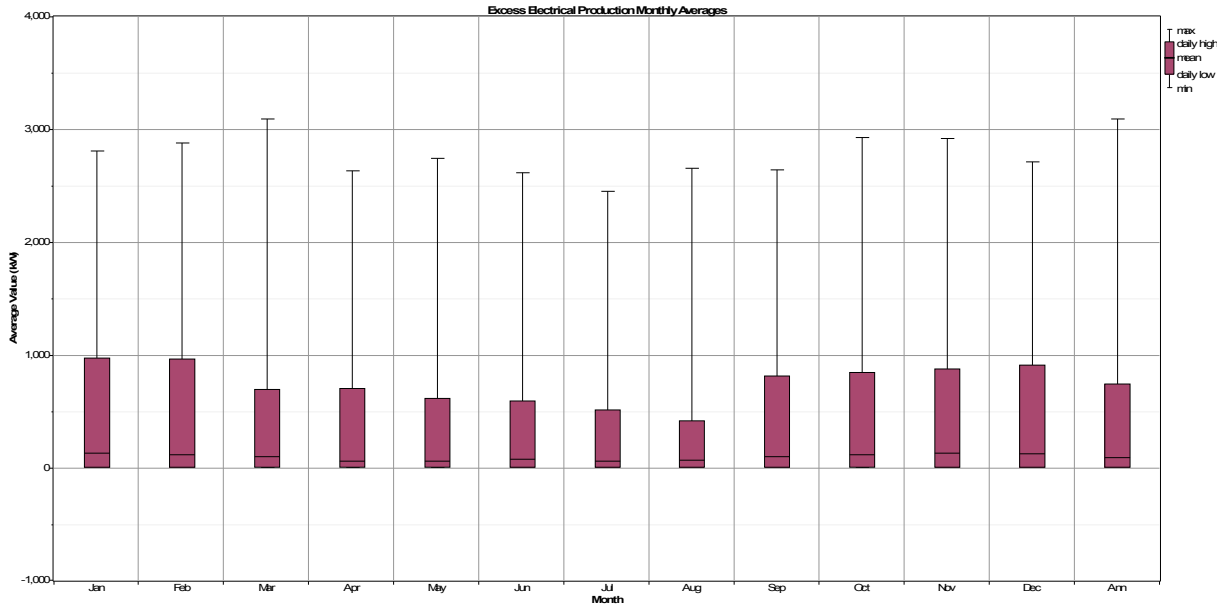
IV.30 :Production mensuelle des batteries.

Malgré tout l'apport important des énergies renouvelables, on remarque que le gain enregistré pour le groupe diesel n'est pas important du tout ; car ce dernier continue à développer une puissance minimale pendant le mois d'aout et qui s'élève à 580kw , et un maximum de 700kw pendant les mois mars et avril.



IV. 31 :la puissance injectée au réseau.

On déduit aussi d'après la figure IV.31 que la puissance injectée au réseau est très importante atteignant des valeurs minimales pendant les mois d'été équivalentes à 450 kw , et de 780kw pendnt le mois de décembre.



IV.32 :excès mensuel de production électrique.

Un excès de production de 1000 kW est enregistré pendant les mois de janvier et février, alors que 400 kW est la valeur minimale enregistrée pendant le mois d'aout.

VI.2.1.1.le cout du système

Les couts des différents générateurs d'énergie, ainsi que ceux des batteries et des convertisseurs, sont illustrés dans le tableau suivant :

composant	Capital (\$/an)	remplacement (\$/an)	O&M (\$/an)	fuel (\$/an)	recupération (\$/an)	total (\$/an)
PV	400000	0	10625	0	0	410625
GE1.5sl	7800	1	675	0	0	8476
GD	60000	4	6938748	192020	0	7190771
Convertisseur	30000	4	750	0	0	30754
Batterie	4375	162	469	0	0	5006
Systeme	2482175	172	7700284	192020	0	10374651

Tableau VI .9 : cout des différents composants du système.

L'histogramme suivant représente la répartition des couts pour les différents composants du système :

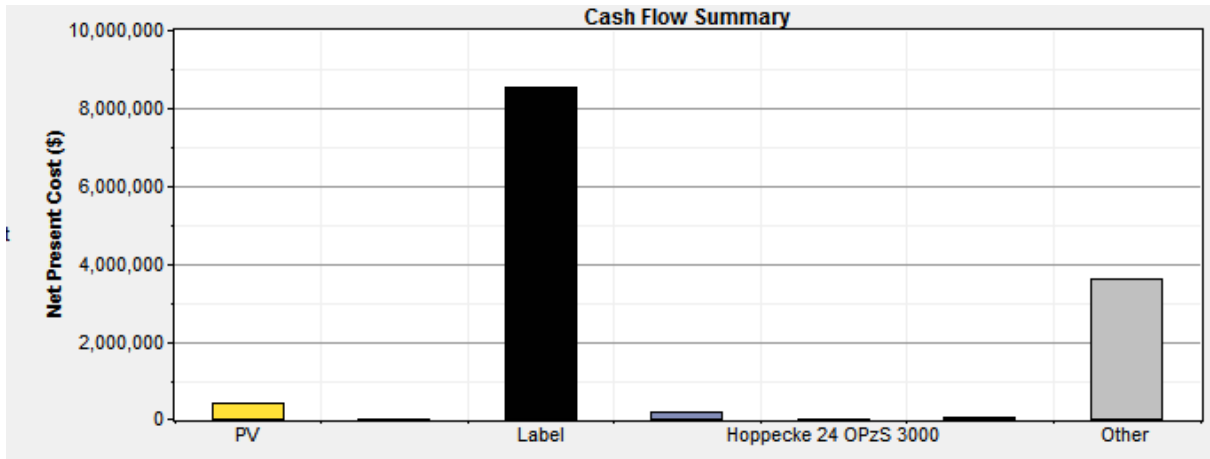


Figure VI.33: répartition du cout du système.

VI.2.2.3 Production électrique

Production	Quantité (KWh/an)	Taux(%)	En-ergie consommée (KWh/an)	Excès d'électricité(%)	Prix spécifique (\$/KWh)	Renouvelable (%)
PV	93.661	2	285 5.007	23.7	1,190	60
GE1.5sl	9013.405	74				
GD	805.757	5				

Tableau VI.10 : production électrique coté électrique.

Nous remarquons que la production électrique de notre système est couverte à 74% par les éoliennes, et les panneaux photovoltaïques ne sont pas significatifs 1%, tandis que le générateur diesel participe avec un taux de 7%, ce qui donne des pertes de l'ordre de 23.4%. Avec un cout spécifique de l'énergie 1,190 \$ /kWh, et l'énergie totale annuelle produite est 2855.007 KWh/an.

On constate que les pertes ne sont pas trop élevées et que la production électrique est basée sur la source de vent.

VI.2.1.2.les émissions

CO2 (kg /an)	CO (kg/an)	SO2 (kg/an)	NOX (kg/an)
1795484	386741	6439	15310

Tableau.VI.11 : les émissions des gaz à effet de serre.

D'après le tableau ci-dessus, on constate que les émissions des gaz à effet de serre de notre système sont acceptable environ 1795484 kg /an pour le CO<sub>2</sub> ,386741 kg/an pour le CO, ces taux des émissions sont causés par le rejet du générateur Diesel en consommant du fuel.

### VI.3.Comparaison des scénarios

la comparaison entre les quatre scénarios :

#### VI.3.1. le cout de système

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
<b>Eolienne</b>	74%	58%	74%	58%
<b>PV</b>	1%	2%	2%	2%
<b>Diesel</b>	7%	7%	6%	7%
<b>Renouvelable</b>	74%	60%	75%	60%
	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
<b>L'excès électrique</b>	23,4%	8,65%	23,6%	8,69%
<b>La consommation de la charge</b>	79%	86%	79%	86%

**Tableau VI.12:** la comparaison avec des % entre les différents scénarios

D'après le tableau :

on remarque que le meilleur scenario c'est le numéro 3 car l'apport de l'énergie renouvelable est de 75%, sans oublier aussi la consommation de ce dernier qui est de 79% . Les pertes les moins importantes sont obtenues dans le scenario 2 de l'apport 8,65% ,mais comme le deux dernier paramètre son parfait dans le scenario 3 ,alors le meilleure installation par rapport a l'apport de l'énergie renouvelable et la consommation totale c'est le dans scenario 3.car aussi le générateur diesel est de 600KVA.

### VI.3.2. Le cout des systèmes

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario3	Scenario4
Cout spécifique de l'énergie (\$/KWh)	0,64	1,441	1,447	1,190
Cout de l'installation(\$)	5605572	12566655	12614835	10374651

**Tableau VI .13:** Le cout des différents systèmes.

On peut constater que la configuration de scenario 03 (6% diesel, 74% éolienne, 2% PV) est la plus couteuse avec 12614835 \$ de cout de l'installation, et par conséquent 1,447\$/KWh.

La configuration de scenario 01 (7% diesel, 74% éolienne, 1% PV) est la plus économique avec un cout du KWh qui ne dépasse pas 0,64\$, et un cout de l'installation d'environ 5605572\$.

### VI.3.3. Les émissions des systèmes

	Scenario 1	Scenario 2	Scénario3	Scenario 4
CO (kg /an)	979083	1817183	911373	1759484
CO (kg/an)	80860	392865	76450	384741
SO2 (kg/an)	2548	6528	2380	6439
NOX (kg/an)	16592	15403	15369	15310

**Tableau VI.14:** les émissions des différents systèmes.

D'après le tableau :

On remarque bien que d'après les quatre scenarios les émissions le plus élevée donc la plus polluante c'est scenario 2 au le générateur diesel est de 1000 KVA, au 1817183 kg/an la quantité de CO<sub>2</sub> rejeté et 392865 kg/an de CO, et le SO<sub>2</sub> est de 6528 kg /an, et 15403 kg/an de NOX.

Et le scénario le moins polluant c'est le scenario 3 au le générateur est de 600KVA, et la quantité de CO<sub>2</sub> rejeté est de 911373 kg/an, et le CO de 76450 kg/an, et le SO<sub>2</sub> de 2380 kg/an, et le NOX est 15369 kg/an.

Donc le scénario 3 est le meilleure et moins polluante sur l'environnement.

### VI.4. Conclusion :

A partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la configuration du scénario 1 (100 kW diesel, éolienne, PV), et le plus rentable économiquement et ce, en se basant sur le prix de l'installation et celui du KWh qui sont les plus rentables dans les cas étudiés. Parallèlement, nous observons qu'il est celui qui a un impact négatif sur l'environnement, en rejetant dans l'air pas moins de 979083 Kg /an de CO<sub>2</sub>.

Contrairement à la configuration du scénario 1, la configuration de scénario 3 (75% de la production est produite par les ressources renouvelable), est la moins rentable sur un plan purement économique avec un prix d'installation qui dépasse 12614839 \$

Et par conséquent un prix de KWh qui avoisine 1,447\$/KWh, mais avec 911373 Kg /an, d'émission de CO2, elle est classé parmi la solution les moins nuisible a l'environnement à l'environnement.

Ce contraste entre l'impact économique et l'impact écologique n'est pas le fruit du hasard, Le prix de diesel, Et les sources renouvelable reste relativement faible dans notre pays, donc le préférence va vers les sources de production classique (diesel), qui l'environnement, au détruisent l'environnement, au détriment des sources de production renouvelable (solaire, éolienne) Certes onéreuses pour des raisons citées dans le chapitre 1 mais sous aucun impact sur notre planète.

### **CONCLUSION GENRALE :**

Dans le présent mémoire, une étude technico- économique d'un système hybride (éolien-photovoltaïque et diesel) à fourniture électrique totalement autonome moyennant le logiciel HOMER, dans un hôpital de thenia en Algérie, a été effectué.

Ces systèmes sont amenés à connaitre des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production et d'un meilleur respect de l'environnement.

C'est dans une perspective de diminution du coût par un dimensionnement optimal du système, et une gestion adéquate de l'énergie que ces travaux s'inscrivent.

Nous avons donc étudié un système hybride répondant aux besoins d'un établissement public (Hôpital de thenia) et nos travaux ont principalement porté sur les analyses technico-économiques de différentes configurations du système.

Après un bref rappel sur les énergies renouvelables et leurs développements dans le monde en générale en ALGERIE plus particulièrement. Les différents composants du système hybride à savoir éolien, photovoltaïque et diesel sont présentés et leurs caractéristiques données. Plusieurs configurations ont été considérées, elles dépendent essentiellement de la constitution de chaque composant du système.

Ces différentes configurations ont été simulées à l'aide du logiciel HOMER, logiciel permettant la détermination du prix KWh produit selon les cas traités, ainsi que la quantité que CO<sub>2</sub> évité.

Toutefois cette solution s'avère nuisible à l'environnement du fait de la quantité de dioxyde de Carbone (CO<sub>2</sub>) rejetée dans l'atmosphère, responsable du réchauffement climatique.

L'Algérie qui fait partie des pays signataires du protocole de KYOTO doit absolument se tourner vers l'utilisation des énergies renouvelables et exploiter au mieux son potentiel renouvelable, important pour répondre à la fois aux besoins énergétiques des populations et aux contraintes environnementales qui ne cessent de s'accroître.

- (1) <http://www.ammonit.com/fr/windinfo/informations-eolien> 27 mars 2018
- (2) <http://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/les-principales-technologies-eoliennes/> 27 mars 2018
- (3) <http://www.ddmagazine.com/2846-Energies-renouvelables-dans-le-monde-les-chiffres-2013.html> 2 avril 2018
- (4) Mr. BOUNACEUR AMIN : Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie  
Année universitaire 2014-2015( UNIVERSITE KASDI MARBAH OUARGLA )
- (5) MEMOIRE De Magister HASSINI et BELGHITRI HOUDA MODELISATION :SIMULATION ET OPTIMISATION D'UN SYSTEME EHYBRIDE EOLIEN-PHOTOVOLTAIQUE 2010 (UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID DE TLEMCEM)
- (6) Site internet de l'entreprise caterpillar [www.CAT.com](http://www.CAT.com) 3 avril 2018
- (7) H. Ibrahim, A. Ilinca and 1. Perron, Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés, Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne LREE-03- Septembre 200
- (8) Haritza CAMBLONG « minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable ». Obtenir e grade de DOCTEUR DE L'Universit2 de Bordeaux.France 2003
- (9) Haritza CAMBLONG minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable . Obtenir le grade de Docteur de l'Université de Bordeaux, France 2003.
- (10) Mr. MEZZAI.M et Mr. MOULOUDJI.S'' « Contribution à l'étude d'un système de pompage photovoltaïque » mémoire de fin d'étude université de Bejaia Juin 2014.
- (11) Pierre PAPET, thèse doctrot en physique, nouveaux concept pour la réalisation de cellule photovoltaïque à conctact inter digités sur substrats minces en silicium cristallin, L'Institut National des science appliques de lyon 2007
- (12). A.RICAUD, « Modules photovoltaïque- Filière technologique », Technique le l'Ingénieur, D3940,2009.
- (13). [www.sarl.energie.com](http://www.sarl.energie.com) 19 avril 1993
- (14 ). Etude centrale hybride photovoltaïque- Eolienne-Diesel- D.Rekiowa.Z.Roumilo et T.Rekioua 2007
- (15). P.BAJPAI nad V.Dash. 'Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone application : A review, « renew.Sustain.Energy Rev,Vol. 16,NO.5,pp.2926-2939,2012.Doi:10.1016/j.rser.2012.02.009
- (16). O.C.Onar, M.S.Alam, '' Modeling, control and simulation of an autonomous wind turbine/photovoltaic/ fuel cell/ ultra hybride power system, "J.Power Sources, vol.185,pp.1273-1283,2008

- (17). <http://energies-renouvelables.consoneo.com/guide/maison-ecologique/les-avantages-les-inconvenients-des-panneaux-solaires-photovoltaieques/724/>
- (18). <http://energieideale.fr/photovoltaique-panneaux-solaires-contraintes-installation-devis>  
11 Mai 2018
- (19). <https://www.cder.dz/spip.php?article1442> 11 Mai 2018
- (20). <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/principe-fonctionnement-eolienne/> 21 Mai 2018
- (21). <https://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=7172>. 21 Mai 2018
- (22) <http://docplayer.fr/68457446-Etude-experimentale-et-economique-d-un-systeme-hybride-solaire-photovoltaique-diesel-sans-stockage-pour-une-production-decentralisee-d-electricite.html> 23 Mai 2018
- (23) [https://dualsun.fr/2014/12/quelle-inclinaison-et-quelle-orientation-du-panneau-solaire-choisir/!](https://dualsun.fr/2014/12/quelle-inclinaison-et-quelle-orientation-du-panneau-solaire-choisir/)  
23 Mai 2018
- (24) M3P SOLAR/R2ALISATION DE PARC SOLAR
- (25) Eolienne et aérogénérateur guide de l'énergie éolienne, Guy Cuntty 2006
- (26) [www.economie-denergie.com](http://www.economie-denergie.com) 23 Mai 2018
- (27) <http://libre-energie.com> 17 Mai 2018
- (28) [www.solariflex.com](http://www.solariflex.com) 17 Mai 2018
- (29) L'avenir des énergies renouvelable.
- (30) Technique de l'ingénieur éolienne

## ملخص:

إن استعمال الموارد المتجددة عرف تطورا كبيرا في البلدان المصنعة و أيضا في بعض الدول السائرة في طريق النمو هذا العمل متصل بالشبكة الكهربائية يستعمل في تغذية حمولة مستشفى الثنية يأخذ في دراسة نظام هجين للطاقة ( الرياح-الكهروضوئية – ديزال ) النظام الطاقوي المدروس في هذه المذكرة من النوع الهجين يحتوي على نوعين من الطاقات المتجددة ( الرياح- الفوتونية-الديزال) متصلة بمحولات الضبط و هي محولات الطاقة الكهربائية المطبقة في مستشفى الثنية

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة, الرياح, الكهروضوئية

## Abstract:

The use of renewable resources has been a great growth in the industrialized countries and even in some underdeveloped countries.

This work focuses on the study of hybrid system (photovoltaic-wind-diesel), connected to the electricity grid, and used to supply hospital of thenia.

The energy system studied in this memory is hybrid with two renewable energy sources (solar and wind) with a label diesel coupled and connected to a control electrical transducers and static converter applied in an isolated site of thenia.

Keywords: Renewable energy, wind, photovoltaic,

## Résumé

L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés.

Ce travail porte sur l'étude d'un système hybride énergétique (photovoltaïque-éolien-diesel), connecté au réseau électrique, utilisé pour satisfaire les besoins électrique dans un hôpital de thenia .

Le système énergétique étudié dans ce travail est du type hybride à deux sources d'énergies renouvelables (solaire et éolienne) cumulée avec un générateur diesel, couplé à un convertisseur statique d'adaptation, et des batteries de stockage et de conversion de formes d'énergie électrique avec une application sur le site de thenia.