

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique**

**CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED**

**INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**LICENCE ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie électrique et Electronique

Spécialité : Réseaux Electrique

**Thème**

**Modélisation d'un système photovoltaïque  
hybride**

Soutenu le ... Juin 2011

Rédiger par :

M<sup>ad</sup>. TKOUTI Nacira

Presenté par :

M. REMHA Souhaib

M. SOLTANI Chouayeb

M. GHILANI El-Habib

## ***SOMMAIRE***

**Dédicaces**

**Remerciements**

**Liste des Tableaux**

**Liste des Figures**

**Liste des abréviations**

**Résumé bilingue**

**Introduction générale** 1

### ***Chapitre I : Énergies Renouvelables***

I-1-	Introduction	3
I-2-	Les énergies renouvelables	3
I-2-1-	L'énergie hydraulique	5
I-2-2-	L'énergie de la biomasse	5
I-2-3-	L'énergie de la géothermie	5
I-2-4-	L'énergie solaire	6
I-2-5-	L'énergie éolienne	6
I-3-	Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie	7
I-3-1-	Potentiel solaire	8
I-3-2-	Potentiel éolien	9
I-4-	Transformation de l'énergie du vent et du soleil en électricité	10
I-4-1-	Conversion de l'énergie photovoltaïque	10
I-4-1-1-	Type de systèmes photovoltaïques	11
I-4-1-1-a-	Systèmes autonomes	11
I-4-1-1-b-	Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	11
I-6	Conclusion	17

### **Chapitre II Modélisation et Commande du Système de Conversion**

#### **Photovoltaïque**

II-1-	Introduction	18
II-2-1-	La cellule photovoltaïque	18
II-2-2-	Le semi-conducteur	18

---

## **SOMMAIRE**

---

II-2-3-	Modèle d'une cellule solaire	20
II-2-4-	Présentation du modèle mathématique	21
II-2-5-	Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque	22
II-2-6-	Influence de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I (V)	23
II-3-	Les modules photovoltaïques	24
II-4-	Les générateurs PV	25
II-5-	Résultats et Interprétations	25
II-6-	Principe de la recherche du point de puissance maximal	27
II-6-1-	Les algorithmes du point de puissance maximale	29
II-7-	Principe de la commande MPPT	30
II-8-	Conclusion	31

### **Chapitre III Modélisation et Commande du Système de Conversion**

#### **Éolienne**

III-1	Introduction	32
III-2	Modélisation du générateur éolien	32
III-2-1	Modèle du vent	33
III-2-2	Modèle de la turbine	33
III-2-3	Modèle du multiplicateur	36
III-2-4	Modélisation de l'arbre de la machine	37
III-3	Commande du générateur éolien	37
III-3-1	Stratégie de maximisation de la puissance	38
III-4	Conclusion	39

### **Chapitre IV : Systèmes Hybrides et Application**

#### **Photovoltaïque-Éolienne**

IV-1-	Introduction	40
IV-2-	Systèmes Hybrides DC pour des Petites Communautés Isolées	40
IV-3-	Systèmes Hybrides AC pour des Petites Communautés Isolées	40
IV-4-	Convertisseurs	41
IV-5-	La charge	42
IV-6-	Application du système hybride éolienne-photovoltaïque	42
IV-7-	Système de conversion d'énergie hybride	42
IV-8-	Résultats de simulations	43

---

## **SOMMAIRE**

---

IV-9- Conclusion	44
<b>Conclusion générale</b>	45
<b>Références bibliographique</b>	46



## *~ Dédicaces ~*

*A tous nos chères mères qui n'ont jamais épargné un effort pour nous aider et de nous encourager. Veuillez trouver en ce travail la consolation et le témoin de la patience et d'amour.*

*A tous nos chers pères qui a été toujours près de nous, pour nous encourager et soutenir. Quisse ce travail exprimer le respect et l'amour que nous vous devons.*

*A nos frères et sœurs, à qui nous souhaitons tout le bonheur du monde. Vous êtes toujours prêts de nous d'une aide très précieuse.*

*A toutes nos familles.*

*A tous nos professeurs qui nous soutenus et encouragés de finir ce mémoire.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui ont confiance à nous.*

# REMERCIEMENTS

Avant tout on remercie Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage la patience, l'aide et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur M<sup>ad</sup>: **TKOUTI Nacira** qui à ménagé un grand effort afin de nous permettre de mener à bien le présent travail et à qui nous exprimons notre gratitude et notre respect.

Nous remercions aux enseignants du département d'électrotechnique.

Tout comme j'exprime mes meilleurs sentiments de gratitude aux honorables membres du Jury qui ont l'amabilité et la patience de supporter notre maladresse.

## Liste de Tableau

<b>Tableau I-1</b>	<i>La répartition de la puissance installée par application.....</i>	7
<b>Tableau I-2</b>	<i>moyenne d'ensoleillement et l'énergie moyenne reçue en Algérie.....</i>	8
<b>Tableau II-1</b>	<i>Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.....</i>	24-25

## Liste des Figures

<b>Figure I-1</b>	<i>Structure de la production d'électricité mondiale en 2005.....</i>	<i>4</i>
<b>Figure I-2</b>	<i>Production d'électricité à partir de sources renouvelables en 2005.....</i>	<i>4</i>
<b>Figure I-3</b>	<i>Répartition des usages de la filière ER en Algérie.....</i>	<i>7</i>
<b>Figure I-4</b>	<i>Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet).....</i>	<i>8</i>
<b>Figure I-5</b>	<i>Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie.....</i>	<i>9</i>
<b>Figure I-6</b>	<i>Energie moyenne reçue en Algérie.....</i>	<i>9</i>
<b>Figure I-7</b>	<i>Carte des vents en Algérie.....</i>	<i>9</i>
<b>Figure I-8</b>	<i>Technologies d'éoliennes.....</i>	<i>13</i>
<b>Figure I-9</b>	<i>Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de <math>\lambda</math> et de l'angle de pas des pales.....</i>	<i>13</i>
<b>Figure I-10</b>	<i>Machine asynchrone avec liaison direct au réseau.....</i>	<i>14</i>
<b>Figure I-11</b>	<i>Machine asynchrone avec liaison indirecte au réseau.....</i>	<i>15</i>
<b>Figure I-12</b>	<i>MADA avec deux convertisseurs MLI en cascade reliés au réseau.....</i>	<i>15</i>
<b>Figure I-13</b>	<i>Machine synchrone reliée au réseau par un ensemble redresseur à diodes, Convertisseur DC/DC et onduleur MLI.....</i>	<i>16</i>
<b>Figure I-14</b>	<i>Machine synchrone au réseau par deux convertisseurs MLI en cascade.....</i>	<i>17</i>
<b>Figure II-1</b>	<i>Système de conversion photovoltaïque.....</i>	<i>18</i>
<b>Figure II-2</b>	<i>Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique en PV.....</i>	<i>19</i>
<b>Figure II-3</b>	<i>Circuit équivalent de la cellule solaire.....</i>	<i>20</i>
<b>Figure II-4</b>	<i>Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....</i>	<i>20</i>
<b>Figure II-5-a</b>	<i>Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V du module photovoltaïque.....</i>	<i>23</i>
<b>Figure II-5-b</b>	<i>Influence de la température sur les caractéristiques I-V du module photovoltaïque.....</i>	<i>24</i>
<b>Figure II-6</b>	<i>Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques.....</i>	<i>25</i>

---

## Liste des Figures

---

<b>Figure II-7- a</b>	<i>La caractéristique <math>P(V)</math> du GPV effet éclairement.....</i>	26
<b>Figure II-7-b</b>	<i>La caractéristique <math>P(V)</math> du GPV effet température.....</i>	27
<b>Figure II-8</b>	<i>Caractéristique courant/ tension / puissance d'un panneau PV.....</i>	28
<b>Figure II-9</b>	<i>La caractéristique <math>I(V)</math>, <math>P(V)</math> et PPM.....</i>	29
<b>Figure II-10</b>	<i>Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT.....</i>	31
<b>Figure III-1</b>	<i>Structure du système de conversion éolien.....</i>	32
<b>Figure III-2</b>	<i>Structure du générateur éolien étudié.....</i>	32
<b>Figure III-3</b>	<i>Dimensionnement géométrique de la voilure Savonius.....</i>	33
<b>Figure III-4</b>	<i>Courbe <math>C_p(\lambda)</math> de la voilure étudiée de type Savonius.....</i>	35
<b>Figure III-5</b>	<i>Caractéristiques <math>P_{eol}(\Omega)</math>.....</i>	36
<b>Figure III-6</b>	<i>Caractéristiques <math>C_{eol}(\Omega)</math>.....</i>	36
<b>Figure III-7</b>	<i>Synoptique de la commande du redresseur et de la machine synchrone.....</i>	38
<b>Figure III-8</b>	<i>Caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation.....</i>	39
<b>Figure IV-1</b>	<i>Système hybride de puissance avec bus DC avec sources renouvelables et générateur diesel.....</i>	40
<b>Figure IV-2</b>	<i>Système hybride de puissance avec mini réseau avec sources renouvelables.....</i>	41
<b>Figure IV-3</b>	<i>Schéma de principe du système hybride.....</i>	43
<b>Figure IV-4</b>	<i>La puissance du système hybride en fonction du temps.....</i>	43

---

## *Liste des abréviations*

<b><i>APP</i></b>	<i>Avec Pièces Polaires</i>
<b><i>BLDCM</i></b>	<i>Brussoles Direct Curent Motors</i>
<b><i>AC</i></b>	<i>Alternative Curent (courant alternatif)</i>
<b><i>DC</i></b>	<i>Direct Curent (courant continu)</i>
<b><i>EnR</i></b>	<i>Energies Renouvelables</i>
<b><i>GSAP</i></b>	<i>Génératrice Synchrone à Aimants Permanents</i>
<b><i>GWEC</i></b>	<i>Global Wind Energie Council</i>
<b><i>PV</i></b>	<i>Photovoltaïque</i>
<b><i>GPV</i></b>	<i>Générateur Photovoltaïque</i>
<b><i>MADA</i></b>	<i>Machine Asynchrone Double Alimentation</i>
<b><i>MSAP</i></b>	<i>Machine Synchrone à Aimants Permanents</i>
<b><i>MLI</i></b>	<i>Modulation de Largeur d'Impulsion</i>
<b><i>MAS</i></b>	<i>Machine Asynchrony</i>
<b><i>MPPT</i></b>	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
<b><i>MS</i></b>	<i>Machine Synchrone</i>
<b><i>SPP</i></b>	<i>Sans Pièces Polaires</i>
<b><i>WT</i></b>	<i>Wind Turbine (Turbine Elaine)</i>
<b><i>PPM</i></b>	<i>point de puissance maximale</i>

### *Résumé*

*Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir.*

*Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie éolienne associée au solaire photovoltaïque. L'utilisation de l'énergie hybride (solaire-éolienne) est de plus en plus utilisée dans diverses applications en sites isolés telles l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération ou le pompage. Son utilisation au niveau du pompage s'est répandue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes.*

الطاقات المتجددة هي طاقات منحدره من الشمس , الرياح , حرارة الأرض الجوفية , تيارات المائية , المد والجزر والكتل الإحيائية , جميعهم لا ينبثق عليها شئ وإلا الشئ القليل من النفايات والانبعاثات الملوثة : هي إذا طاقات المستقبل.

هذه الطاقات تجمع ثانية كل أنواع التخصصات التكنولوجية وفقا لمنبع الطاقة المقومة و الطاقة نافعة المحصلة. التقويم المدروس في هذه المذكرة طاقة الرياح مشترك مع الطاقة الشمسية المولدة للكهرباء. استعمال الطاقة الهجينة ( شمس - رياح) من بين الأكثر استعمالا في مختلف التطبيقات منها مناطق المعزولة مثل الإنارة , والاتصالات, والتبريد والمضخات . تستعمل على مستوى المضخات المنتشرة بسرعة خصوصا في المناطق ريفية و الصحراوية .

**PERSPECTIVES**

Plusieurs perspectives à envisager peuvent être cités dans ce qui suit, vu la diversité  
On traite pour une autre configuration hybride photovoltaïque-hydraulique.

### Introduction Générale

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz,...) ou fissiles (nucléaire), ressources épuisables et polluantes à la fois [1]. Pour un développement durable, les ressources énergétiques renouvelables sont « propres » et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins. Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis les années 1990 à un décollage significatif des filières de production d'électricité d'origine renouvelable.

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir !

Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité (en intégrant l'hydroélectricité). Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. **La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie éolienne associée au solaire photovoltaïque.**

Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie à plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles. De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique intègre différents organes électrotechniques. Afin de maximiser l'efficacité de cette conversion d'énergie, de nombreuses solutions ont été examinées aussi bien au niveau de la génératrice à utiliser que de l'électronique de puissance. La plupart des dispositifs utilisent des machines synchrones ou asynchrones mais des études sont aussi réalisées dans l'objectif de développer des machines spéciales. L'interface électronique de puissance entre l'éolienne et la charge a généralement pour but de commander le générateur afin d'extraire un maximum de puissance du vent.

## Introduction Générale

---

L'utilisation de l'énergie hybride (solaire-éolien) est de plus en plus utilisée dans diverses applications en sites isolés telles l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération

L'objectif du présent travail est de faire la modélisation de la chaîne de conversion éolienne ainsi que celle photovoltaïque et l'assemblage entre ces deux sources pour montrer l'importance du système hybride du côté énergétique.

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

- Premier chapitre expose les différentes sources d'énergies renouvelables existantes ; nous focalisons notre attention sur la production d'électricité éolienne et Photovoltaïque
- Deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque et résultats de simulation
- Troisième chapitre présente la modélisation de la chaîne de conversion éolienne.
- Quatrième chapitre présente un système hybride photovoltaïque-éolien et l'avantage de cette association de ces deux sources d'énergie renouvelable.

Nous achevons notre mémoire par une conclusion générale qui montre si les objectifs préfixés ont été atteints. Aucune investigation ne manque de perspectives, alors dans notre cas ils existent plusieurs. Finalement, on trouve une bibliographie non exhaustive qui cite les principales sources d'informations utilisées.

## **I-1- Introduction**

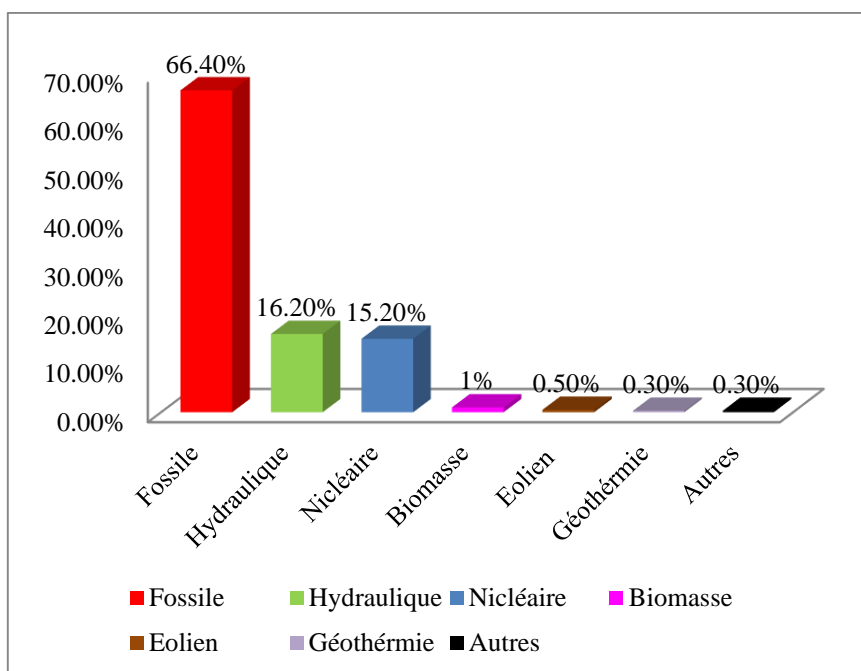
La production d'énergie électrique utilise principalement des combustibles fossiles et fissiles (nucléaire). Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, permet d'avoir de faibles coûts de production mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre. Selon [2], la production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. L'énergie d'origine nucléaire qui ne rejette pas directement de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique à cause des risques importants encourus. Certes, les risques d'accident liés à leur exploitation sont très faibles mais les conséquences d'un accident seraient désastreuses. Par ailleurs, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux : la radioactivité des produits traités reste élevée durant de nombreuses années. Enfin, les réserves d'uranium sont comme celles du pétrole limitées (moins de 100 ans au rythme actuel de consommation).

Bien que notre pays soit excédentaire en production électrique aujourd'hui, l'avenir n'est donc pas prometteur sur les ressources en énergies fossiles dont les réserves ne cessent de diminuer et dont les prix fluctuent énormément en fonction de la conjoncture. La préparation de l'avenir dans les domaines de production énergétique doit se prévoir dès aujourd'hui, pour pouvoir faire face progressivement aux changements énergétiques inévitables. Chaque innovation et chaque avancée en matière de recherche n'aura de retombées que dans une dizaine d'année au mieux, le temps d'effectuer les tests nécessaires et d'envisager la mise en production sans risque pour l'utilisateur autant pour sa propre santé que pour ses installations électriques.

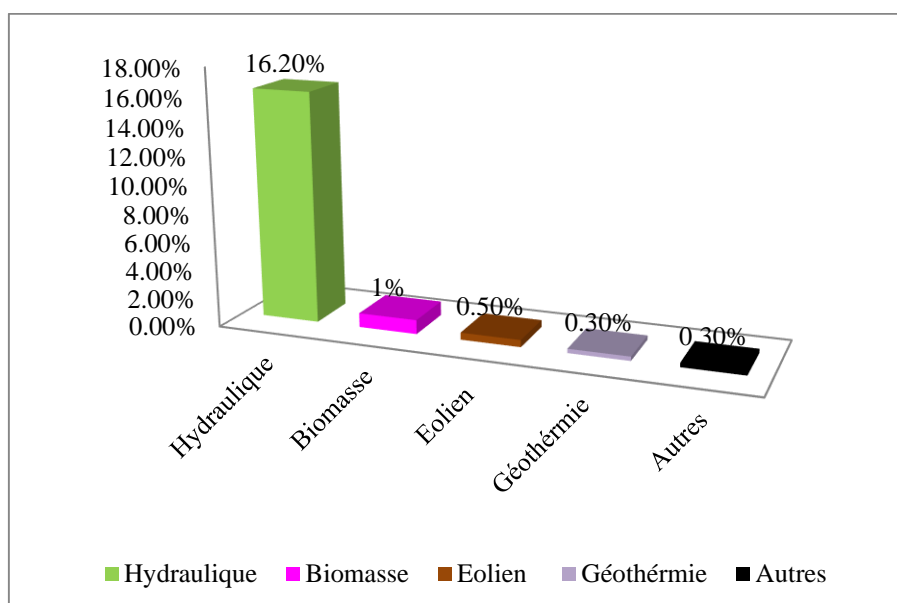
## **I-2- Les énergies renouvelables**

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins [3]. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables

offre une plus grande sûreté d’approvisionnement des consommateurs tout en respectant l’environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d’exploitation des systèmes de récupération d’énergie. La figure (I-1) présente la production mondiale d’électricité en 2005 et la figure (I-2) fait un zoom sur les énergies renouvelables.



**Figure I-1** Structure de la production d’électricité mondiale en 2005



**Figure I-2** Production d’électricité à partir de sources renouvelables en 2005

### **I-2-1- L'énergie hydraulique**

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. On discerne la petite hydraulique (inférieure à 10 MW) et la grande hydraulique (supérieure à 10 MW). Dans le cadre de la production décentralisée on va considérer essentiellement la petite hydraulique [4]. La petite hydraulique est constituée en grande majorité par des centrales au fil de l'eau ce qui les rend fortement dépendantes du débit des cours d'eau.

### **I-2-2- L'énergie de la biomasse**

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) En 2005, la biomasse est la deuxième source d'électricité renouvelable mondiale avec 1 % de la production d'électricité mondiale [5].

### **I-2-3- L'énergie de la géothermie**

Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- la géothermie à haute énergie ou géothermie privilégiée qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité [6].
- La géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100 °C. La principale utilisation est appliquée pour les réseaux de chauffage urbain.
- La géothermie de très basse énergie : géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30 °C. Sa principale utilisation est le chauffage et la climatisation individuelle Par rapport à d'autres énergies

renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue, car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie.

#### **I-2-4- L'énergie solaire**

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $\text{kWc/m}^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année[7].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- **L'énergie solaire thermique:** qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- **L'énergie solaire photovoltaïque:** qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.
- **L'énergie solaire passive:** est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

#### **I-2-5- L'énergie éolienne**

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. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît

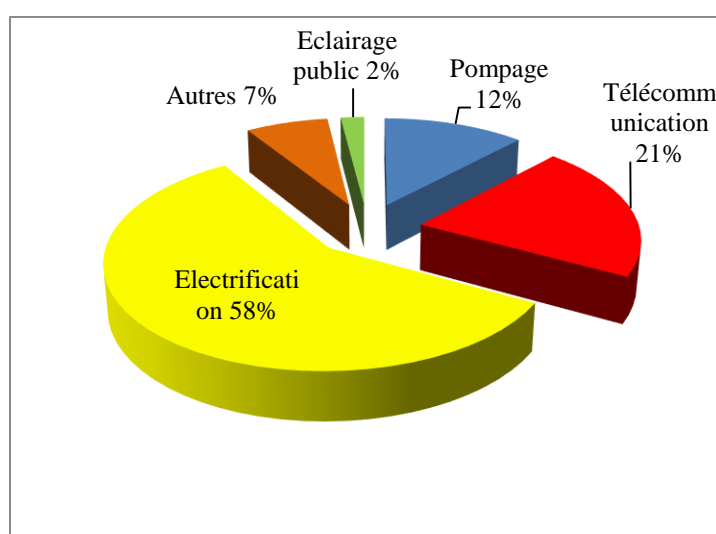
depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an [8]. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), le parc éolien pourrait atteindre une puissance installée de 230 GW en 2020 [6], soit plus de 5 fois la puissance installée en 2005 qui était de 40 GW. Le principal inconvénient de cette source d'énergie est l'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent.

### I-3- Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie

Le potentiel de l'énergie renouvelable en Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays. Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics, le marché local doit atteindre 500 MW cette année 2010, amenant la part de l'électricité produite par les énergies renouvelables à 5% de l'électricité totale produite [6].

<i>Application</i>	<i>Puissance installée (KW)</i>	<i>Pourcentage</i>
<i>Electrification</i>	1353	58%
<i>Télécommunication</i>	498	21%
<i>Pompage</i>	288	12%
<i>Eclairage public</i>	48	2%
<i>Autres</i>	166	7%

*Tableau I-1 La répartition de la puissance installée par application*



*Figure I-3 Répartition des usages de la filière ER en Algérie*

### I-3-1- Potentiel solaire

Part sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [6].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

Tableau I-2 moyenne d'ensoleillement et l'énergie moyenne reçue en Algérie

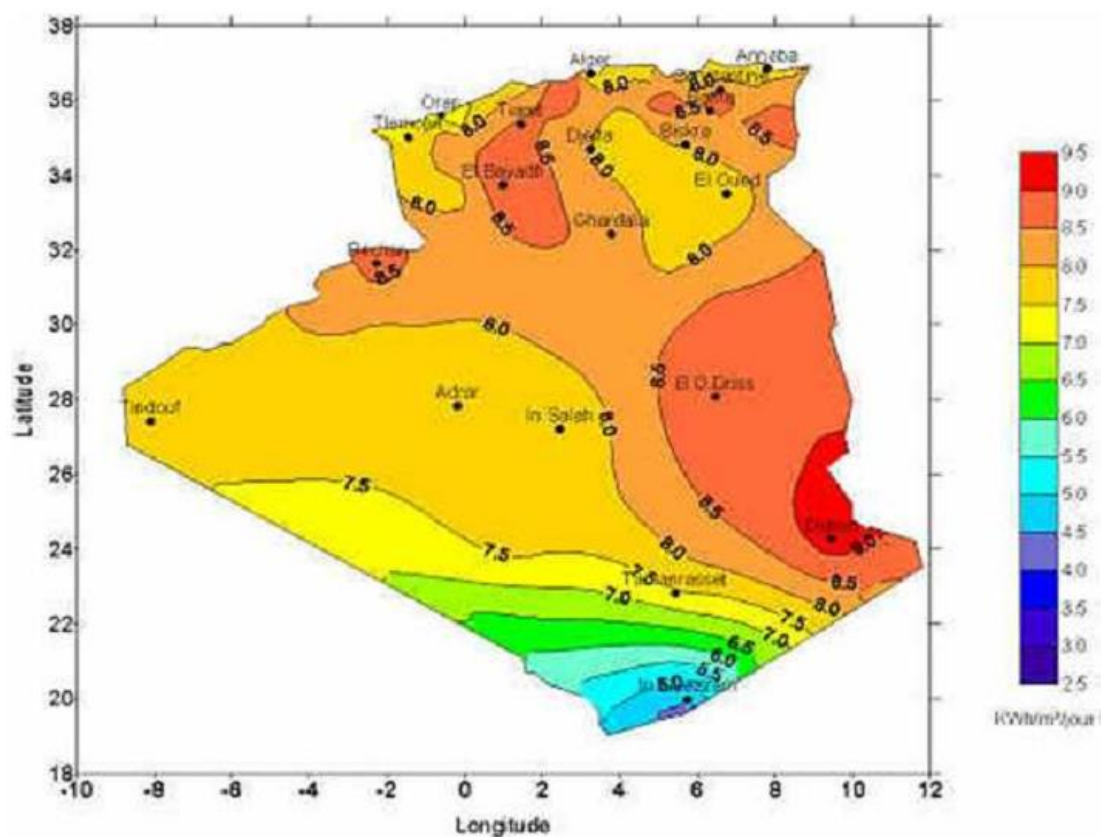
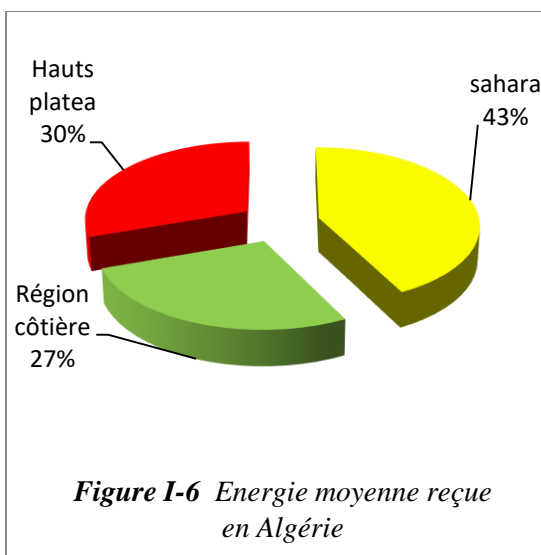
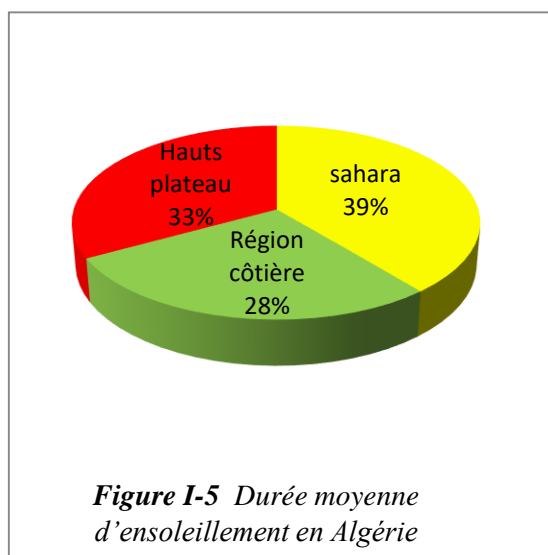
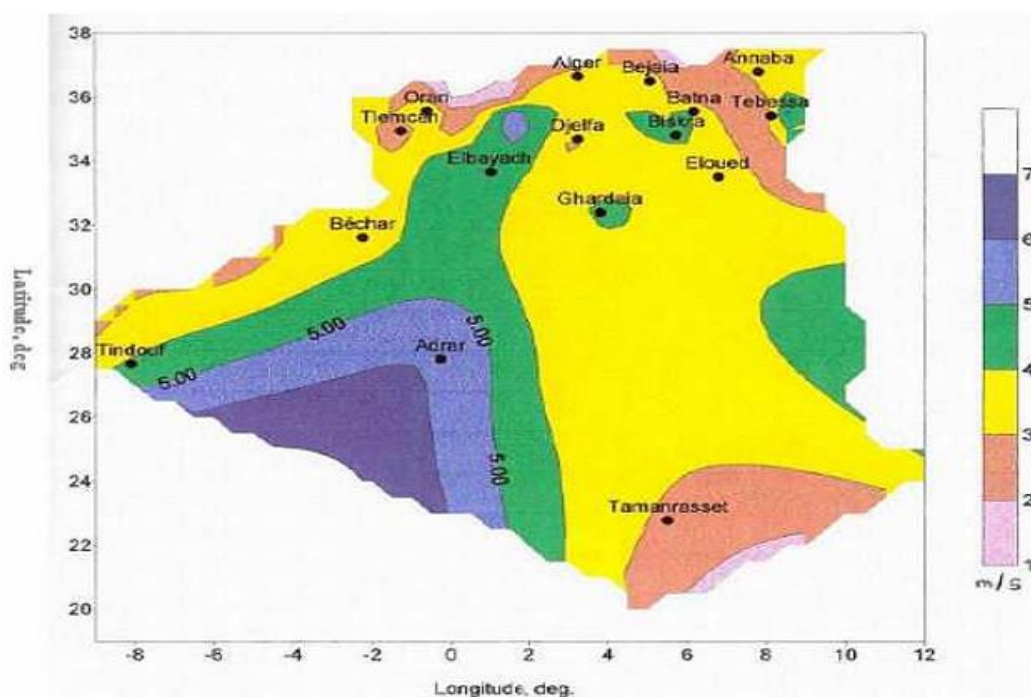


Figure I-4 Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet)



### I-3-2- Potentiel éolien

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4 m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar [6].



#### **I-4- Transformation de l'énergie du vent et du soleil en électricité**

A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables (issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse) sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Les filières étudiées dans ce travail sont l'énergie éolienne et solaire photovoltaïque.

##### **I-4-1- Conversion de l'énergie photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [6]. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. La caractéristique I-V du GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, le point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler les deux éléments le plus parfaitement possible. Le problème du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue n'est pas encore réellement résolu. Un des verrous technologiques qui existe dans ce type de couplage est le problème du transfert de la puissance maximale du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale (PPM). La littérature propose une grande quantité de solutions sur l'algorithme de contrôle qui effectue une recherche de point de puissance maximale lorsque le GPV est couplé à une charge à travers un convertisseur statique.

### **I-4-1-1- Type de systèmes photovoltaïques**

Les systèmes PV sont deux types : autonomes et reliés au réseau [6] :

#### **I-4-1-1-a- Systèmes autonomes**

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

#### **I-4-1-1-b- Systèmes photovoltaïques connectés au réseau**

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA). Etant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil.

### **I-4-1-2- Avantages et inconvénients d'une installation PV [8]**

#### **I-4-2-2-a- Avantages**

- d'abord, une haute fiabilité. 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.
- ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

#### **I-4-2-2-b- Inconvénients**

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la 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 compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV . Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

- tributaire des conditions météorologiques.

- lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

- le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

#### **I-5- Contexte de la conversion d'énergie éolienne**

##### **I-5-1- Différents types d'aérogénérateurs**

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice [9] :

- les turbines éoliennes à axe horizontal.

- les turbines éoliennes à axe vertical.

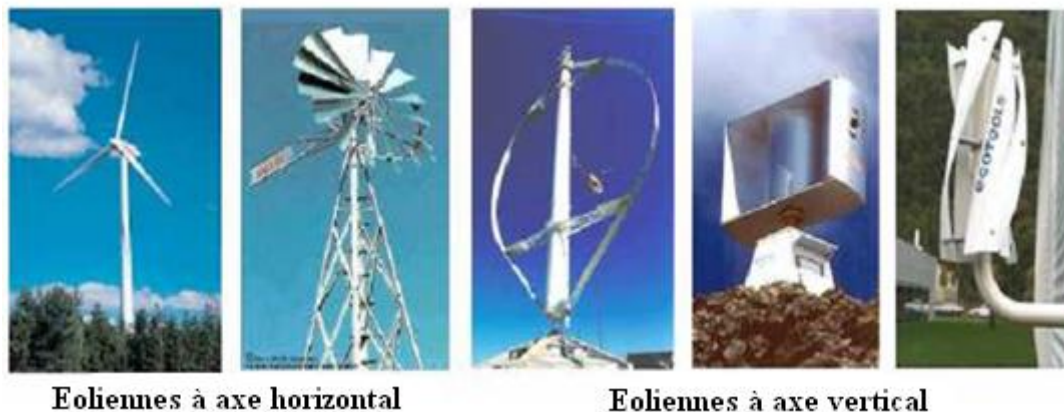


Figure I-8 Technologies d'éoliennes [9]

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée  $\lambda$ .

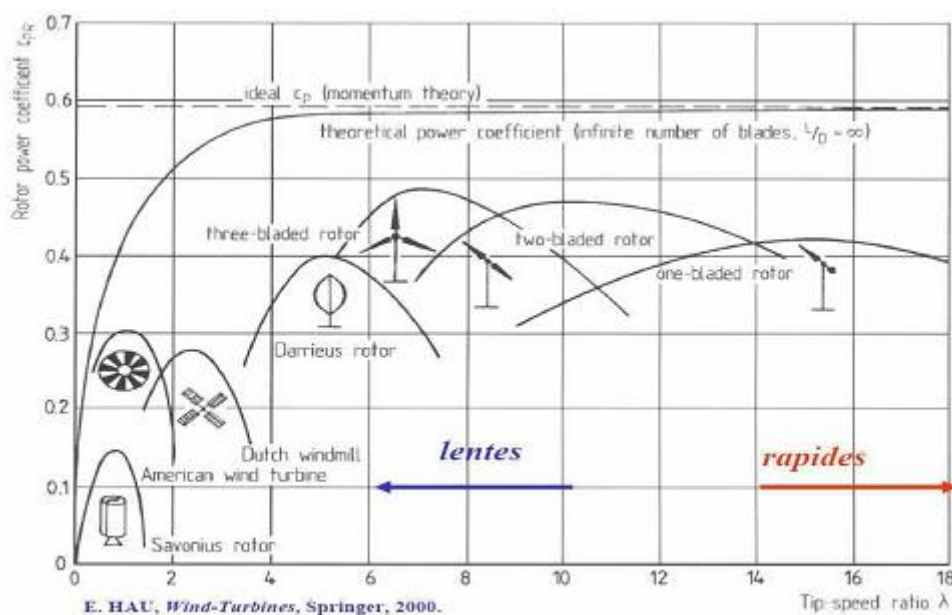


Figure I-9 Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de  $\lambda$  et de l'angle de pas des pales, tiré de [10]

### I-5-2- Structure des systèmes de conversion de l'énergie éolienne

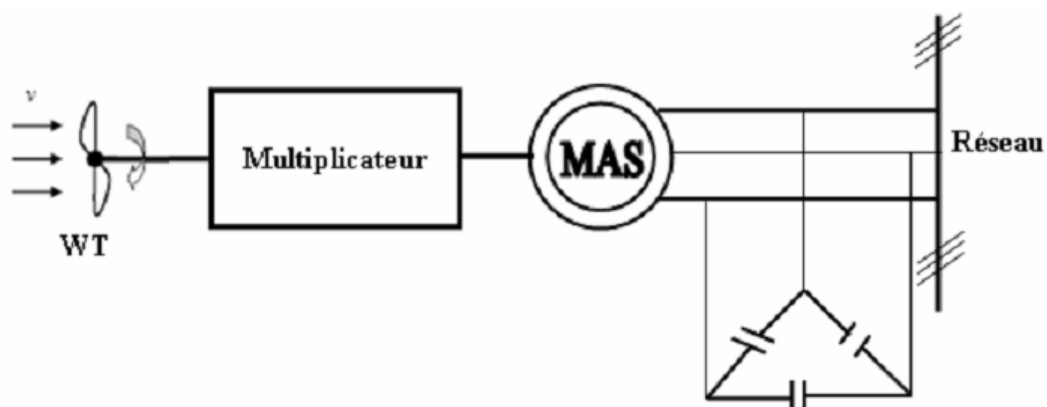
La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes : au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique.

En fonction du type de générateur utilisé, il existe actuellement trois principaux types de systèmes éoliens :

- système éolien à vitesse fixe avec machine asynchrone à cage (S.E.I.G.)
- système éolien à vitesse variable avec machine asynchrone à double alimentation (D.F.I.G. ou MADA )
- système éolien à vitesse variable avec machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants.

### 1-5-2-1- Systèmes utilisant la machine asynchrone

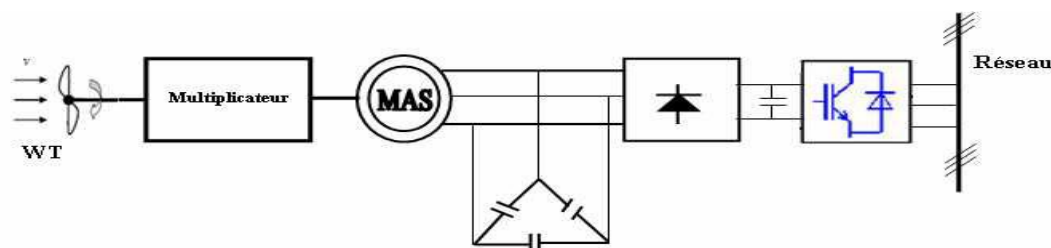
La machine asynchrone équipe actuellement une grande partie du parc éolien. Elle a l'avantage d'être robuste et de faible coût.



*Figure I-10 Machine asynchrone avec liaison direct au réseau*

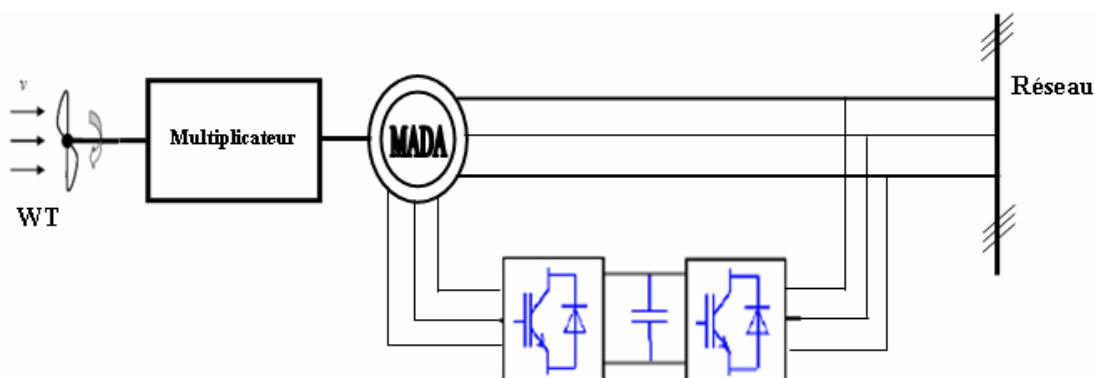
Une topologie consiste à relier directement une MAS à cage d'écureuil au réseau (Figure I-10). Un multiplicateur est associé à la machine et un banc de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS. L'avantage de cette architecture est sa simplicité et son faible coût. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage/décrochage au réseau [11]. Cette structure est largement employée au Danemark depuis les années 70. Le dispositif de la figure (I-12) permet de fonctionner à vitesse variable. Le redresseur à diodes fournit une tension continue variable en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne qui peut

être exploitée par un onduleur MLI pour renvoyer sur le réseau une tension alternative à la fréquence adéquate et des courants sinusoïdaux.



*Figure I-11 Machine asynchrone avec liaison indirecte au réseau*

La magnétisation de la machine s'effectue avec un banc de condensateurs. Cette solution met en œuvre des convertisseurs de puissance qui doivent être dimensionnés pour la puissance totale envoyée par le générateur sur le réseau (coût et pertes importants) et des condensateurs pénalisants en termes de coût. Ces inconvénients ont freiné le développement industriel de cette structure.



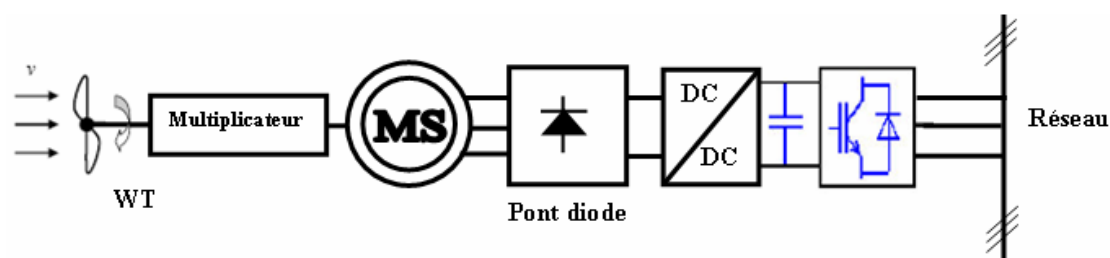
*Figure I-12 MADA avec deux convertisseurs MLI en cascade reliés au réseau*

La figure (I-12) montre une configuration avec la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). La MADA a la particularité de disposer de deux bobinages triphasés au stator et au rotor. L'un est relié directement au réseau et transfère la plus grande partie de la puissance alors que l'autre de moindre puissance permet de faire varier les courants rotoriques d'excitation de la MADA. C'est sur ce bobinage de moindre puissance que le convertisseur de puissance, composé d'un ensemble redresseur/onduleur MLI en cascade, est inséré afin de contrôler la vitesse de rotation de la machine. Un tel dispositif a l'avantage de fonctionner à vitesse variable en faisant intervenir un convertisseur de faible

puissance. Celui-ci a une puissance de l'ordre de 30 % de la puissance nominale fournie au réseau [12].

### I-5-2-2- Systèmes utilisant la machine synchrone

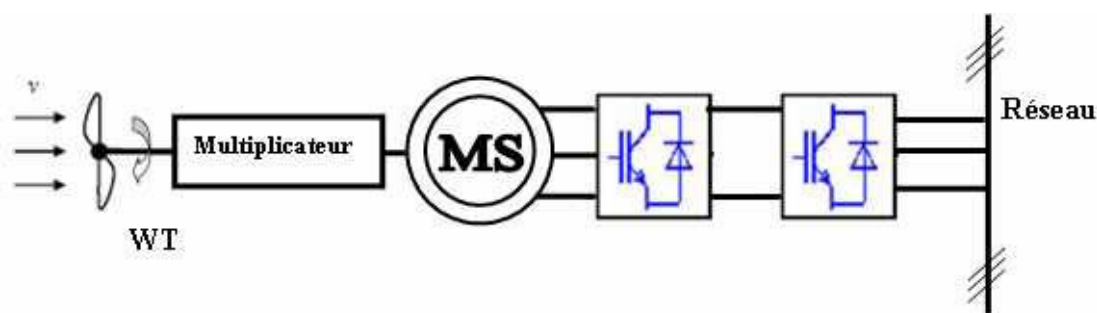
La Machine Synchrone (MS) a l'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique notamment pour la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP). Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que la MAS. Plusieurs structures sont possibles pour la machine synchrone. On notera que pour chaque topologie, il est possible de s'affranchir du multiplicateur de vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents à grand nombre de paires de pôles.



**Figure I-13** Machine synchrone reliée au réseau par un ensemble redresseur à diodes, Convertisseur DC/DC et onduleur MLI

Un redresseur à diodes, associé ou non à un convertisseur DC/DC, peut être utilisé (figure I-13). Cette solution est avantageuse sur le plan économique mais la qualité des courants de la génératrice est moins bonne qu'avec un redresseur MLI ; de plus le nombre de degrés de liberté sur l'ensemble de la chaîne de conversion est plus faible (trois contre quatre).

La machine synchrone peut être associée à un redresseur MLI qui permet de fonctionner à vitesse variable et donc de maximiser la puissance (figure I.14). La topologie utilisant un redresseur à diodes et un boost comme convertisseur DC/DC est considérée comme la configuration optimale par Carlsson au regard du coût, de la qualité de l'énergie et du facteur de puissance [12].



**Figure I-14** Machine synchrone au réseau par deux convertisseurs MLI en cascade

La structure de la figure (I-14) peut aussi être utilisée avec une MAS [13]. Dans ce cas, le redresseur MLI assure la magnétisation de la machine asynchrone et le banc de condensateurs n'est plus nécessaire.

### I-5-3- Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Tous système de production d'énergie a ses avantages et ses inconvénients :

#### 1-5-3-a- Avantages

- non polluante
- inépuisable (énergie du vent)
- peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés)
- peut être complémentaire des filières traditionnelles.

#### I-5-3-b- Inconvénients

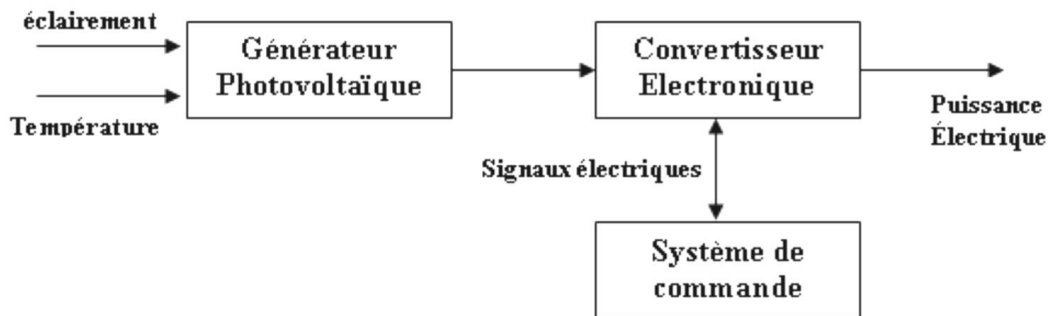
- aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent)
- bruit des pales
- impact visuel
- interférences électromagnétiques

## I-6- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu des possibilités des énergies renouvelables, en nous focalisant davantage sur les filières éolienne et photovoltaïque et les technologies associées. Nous avons ainsi présenté les différents types de générateurs électriques utilisés dans les turbines éoliennes et les principales applications des éoliennes. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux machines à aimants permanents et aux caractéristiques des aimants constitutifs. Nous avons enfin présenté différentes variantes de convertisseurs utilisés dans les énergies renouvelables.

## II-1- Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons d'abord la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque puis décrirons les modèles mathématiques des composants du système. Comme la chaîne de conversion éolienne, le système de conversion photovoltaïque est basé sur des blocs modulaires, comme représenté dans la figure (II-1) :



*Figure II-1* Système de conversion photovoltaïque

Ainsi, la modélisation du système de conversion photovoltaïque suppose la modélisation du générateur photovoltaïque (la cellule PV, les panneaux et leurs connections) et de l'ensemble hacheur système de commande et, pour finir, étudier le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, à savoir rechercher le point de puissance maximale (MPPT).

### II-2-1- La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs [14].

### II-2-2- Le semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charge libre est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

C'est l'énergie du « bande gap »,  $E_g$  en électronvolt ( $eV$ ). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8  $eV$  pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1  $eV$  pour le silicium cristallin (c -  $Si$ ), et 1.7  $eV$  pour le silicium amorphe (a -  $Si$ ).

Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons particules de lumière en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera à travers l'épaisseur de la cellule [39].

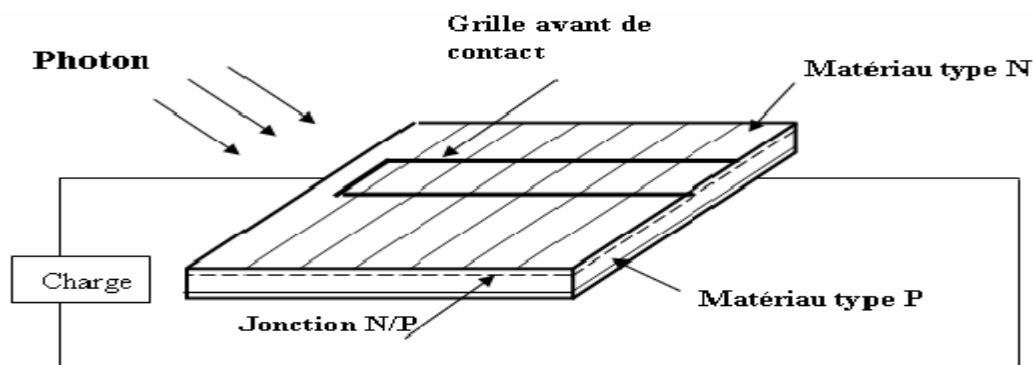
Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande gap vont libérer un électron négatif, laissant un 'trou' positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un Courant électrique, il faut introduire un champ électrique  $e$ , de part et d'autre de la cellule.

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du 'dopage' par des impuretés. Deux types de dopage sont possibles :

- Le dopage de type  $n$  (négatif) consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrices des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore ( $P$ ) dans le silicium ( $Si$ ). Dans un matériau de type  $n$ , on augmente fortement la concentration en électrons libres.
- Le dopage de type  $P$  (positif) utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. Le bore ( $B$ ) est le dopant de type  $P$  le plus couramment utilisé pour le silicium.

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type  $n$  et type  $P$ ) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libre (électrons et trous), un champ électrique constant crée par la présence d'ions fixes positifs et négatifs.

Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque. Lorsque l'énergie du bande gap augmente, le courant diminue mais la tension est plus élevée [14].



**Figure II-2** Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique en PV [40]

### II-2-3- Modèle d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque peut être illustrée par son schéma équivalent comme le montre la figure (II-3).

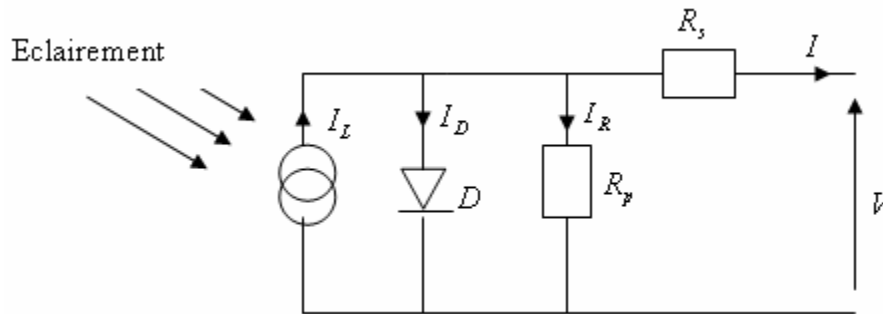


Figure II-3 Circuit équivalent de la cellule solaire

La cellule comporte une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance en dérivation ou shunt ( $R_p$ ). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la fonction dont celle-ci a été réalisée.

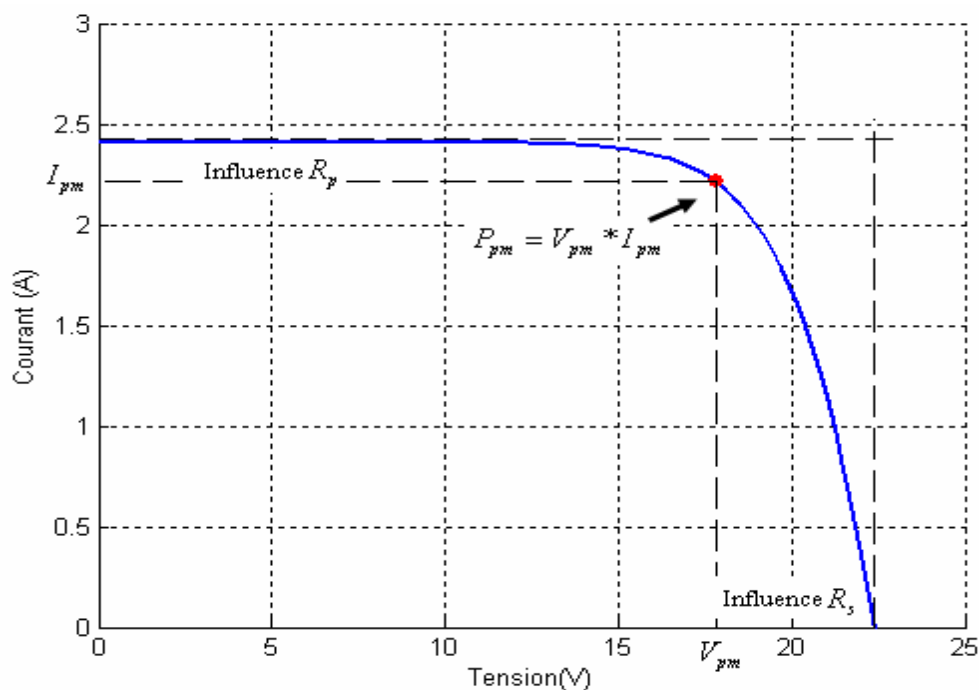


Figure II-4 Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

### II-2-4- Présentation du modèle mathématique

A partir de la figure (II-3) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

$$I_L = I_D + I_R + I \quad (\text{II.1})$$

Le courant de jonction  $I_D$  est donné par :

$$I_D = I_0 \left( e^{q \left( \frac{V+R_S I}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

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

$$I_R = \frac{V+IR_S}{R_p} \quad (\text{II.3})$$

A partir de l'équation (II.1), on obtient l'expression de courant  $I$  :

$$I = I_L - I_D - I_R \quad (\text{II.4})$$

Remplaçons dans (II.4) les équations (II.2) et (II.3) l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_L - I_0 \left( e^{q \left( \frac{V+R_S I}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{(V+IR_S)}{R_p} \quad (\text{II.5})$$

Où :

$I$  : Le courant de cellule.

$V$  : La tension de cellule.

$R$  : La résistance série de la cellule. [ $\Omega$ ]

$T$  : La température de la cellule [ $^{\circ}\text{K}$ ].

$q$  : La charge d'électron  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

$I_0$  : Le courant de saturation [A]

$K$  : La constante de Boltzmann ( $1.3854 \times 10^{-2} \text{ JK}^{-1}$ ).

$V_g$  : La tension de seuil de diode (1.1V).

$n$  : Le facteur de qualité de diode.

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ( $R_p = \infty$ ) l'équation (II.5) de vienne:

$$I = I_L - I_0 \left( e^{q \left( \frac{V+R_S I}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

L'équation (II.6) en termes de  $I$  et  $V$  n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton- Raphson) doit être appliquée.

### II-2-5-Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [15] :

#### - Courant de court circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_s$  nulle et  $R_p$  infinie), ce courant se confond avec le photo courant  $I_L$  dans le cas contraire, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (II.2), on obtient:

$$I_{cc} = I_L - I_0 \left( e^{q \left( \frac{R_s I_{cc}}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_p} \quad (II.7)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme  $I_0(e^{q \left( \frac{R_s I_{cc}}{nKT} \right)} - 1)$  devant  $I_L$ .

L'expression approchée du courant de court circuit est alors :  $I_{cc} = \frac{I_L}{\left( 1 + \frac{R_s}{R_p} \right)}$

#### - Tension de circuit ouvert

C'est la tension  $V_{co}$  pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_L - I_0 \left( e^{q \left( \frac{V_{co}}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_p} \quad (II.8)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = \left( \frac{q}{nKT} \right) \times \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (II.9)$$

#### - Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ( $V_{pm} \times I_{pm}$ ) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit  $I_{cc} \times V_{co}$ .

Où :  $I_{cc}$  intensité de court-circuit et  $V_{co}$  tension de circuit ouvert.

$$FF = \frac{I_{pm} V_{pm}}{I_{cc} V_{co}} \quad (II.10)$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

**- Le rendement**

Le rendement ( $\eta$ ), des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ .

$$\eta \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF.V_{oc}.I_{cc}}{P_{in}} \tag{II.11}$$

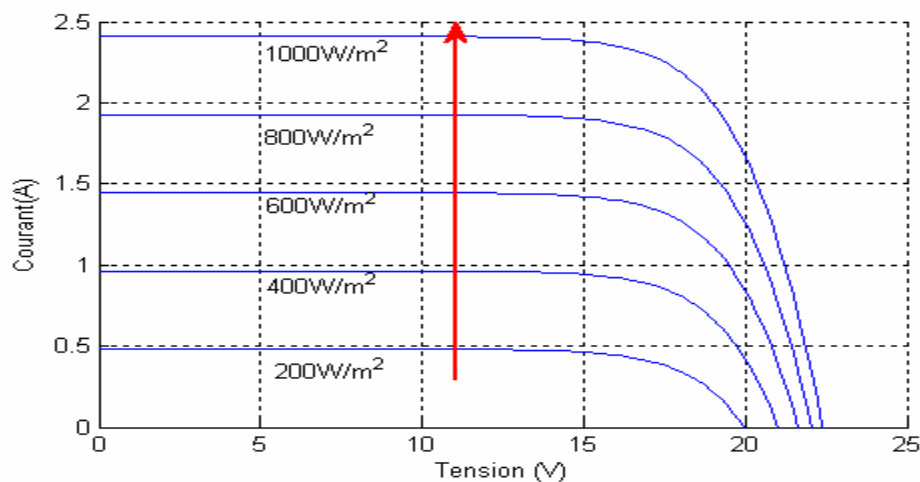
Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert [16].

**II-2-6- Influence de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I(V)**

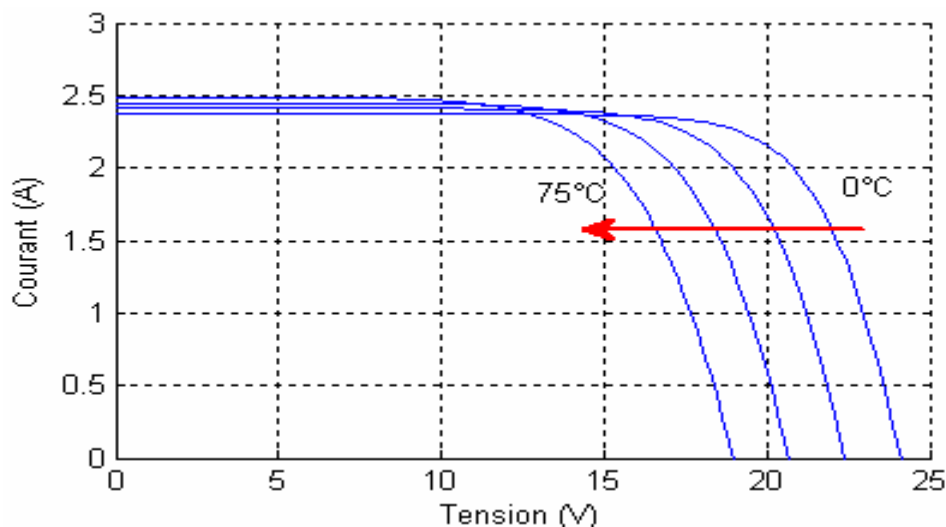
Le courant produit par la photopile ( $I_{ph}$ ) est pratiquement proportionnel au flux lumineux ( $E$ ) ; par contre, pour la tension ( $V$ ) aux bornes de la jonction N-P du matériau lui-même, sa dépendance est minimale. La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule ( $P_m$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement ;
- Les points de puissance maximale se situent presque à la même tension.

La température a un effet très important sur la tension de circuit ouvert et un effet non remarquable sur le courant de court circuit de la cellule (voir Figure (II-5-a, II-5-b)). Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ  $0.025 \text{ mA/cm}^2/\text{°C}$  alors que la tension décroît de  $2.2 \text{ mV}/\text{°C}$  cellule. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ  $0.4\%/\text{°C}$ . Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque [17].



**Figure II-5-a** Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V du module photovoltaïque



**Figure II-5-b** Influence de la température sur les caractéristiques I-V du module photovoltaïque

### II-3- Les modules photovoltaïques

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge et les modules auront donc généralement 36 cellules. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série, si en additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

Pour notre présente étude, on a choisi le module photovoltaïque du type AEGPQ-40 dont les caractéristiques électriques du module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant [17].

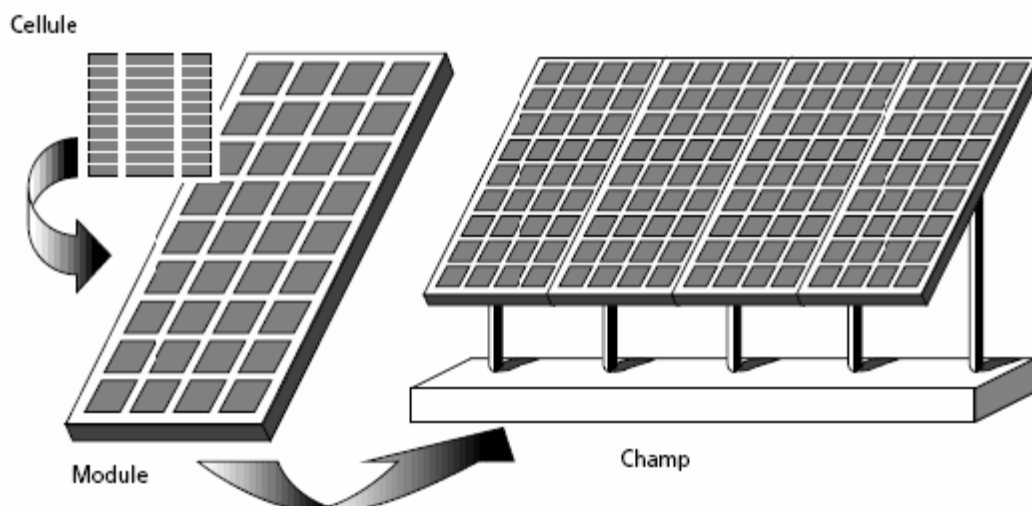
Spécifications du module solaire AEG PQ10/40/01-02	
Température ( $T_{ref}$ )	25 °C
Eclairement ( $E_{ref}$ )	1000 W/m <sup>2</sup>
Tension du circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	22.4 V
Courant du court circuit ( $I_{sc}$ )	2.41 A
Tension du point de puissance maximale ( $V_m$ )	17.45 V

Courant du point de puissance maximale ( $I_m$ )	2.2 A
Puissance maximale ( $P_m$ )	38 W

*Tableau II-1* Caractéristiques électriques du module photovoltaïque

#### II-4- Les générateurs PV

Les modules PV sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV. L'énergie fournie par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu (figure II-6).



*Figure II-6* Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques [38]

Pour le générateur, la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  est obtenue par :

$$I_{pv} = N_p I \tag{II.12}$$

$$V_{pv} = N_s V \tag{II.13}$$

Où :  $N_p$  est le nombre de modules en parallèles et  $N_s$  le nombre de modules en séries.

#### II-5- Résultats et Interprétations

Les résultats de la simulation du générateur photovoltaïque sont représentés par les figures (II-5, II-7) :

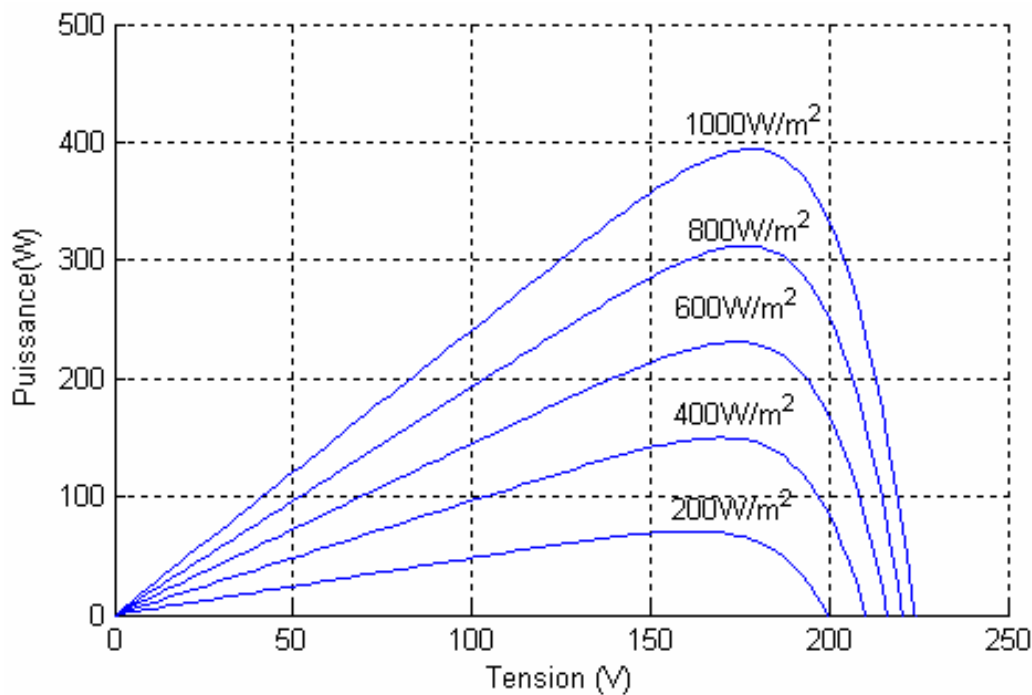
- La figure (II-5-a) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I(V)$ . A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit

est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

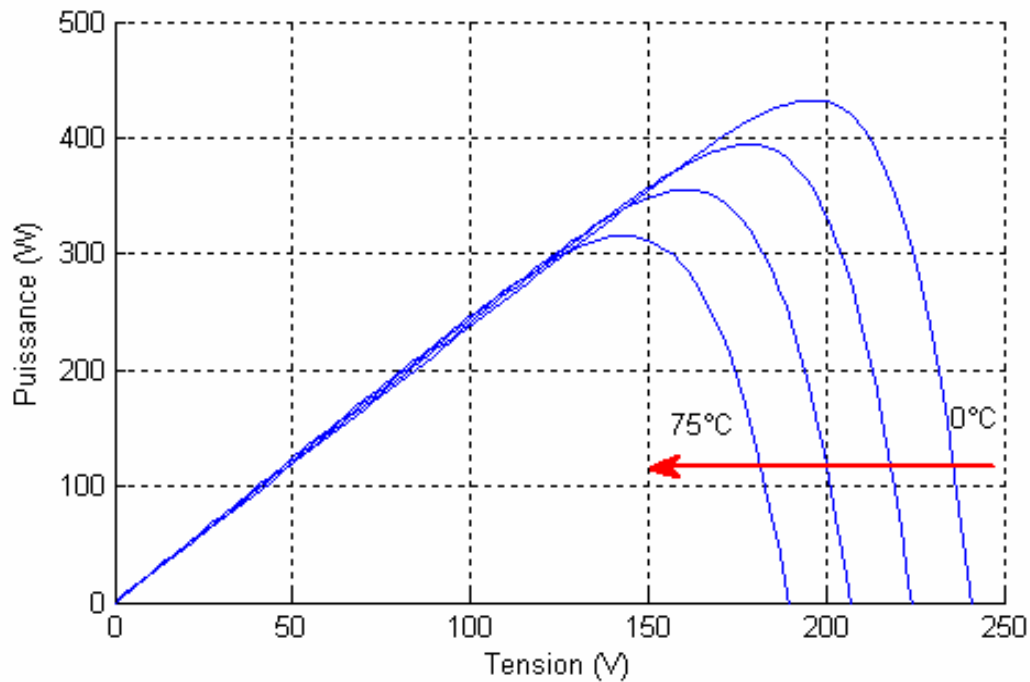
- La figure (II-5-b) montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur

la caractéristique  $I(V)$ . Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouverte. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

- La figure (II-7-a) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$  et l'influence de la température sur la caractéristique  $P(V)$  du générateur illustre sur la figure (II-7-b).



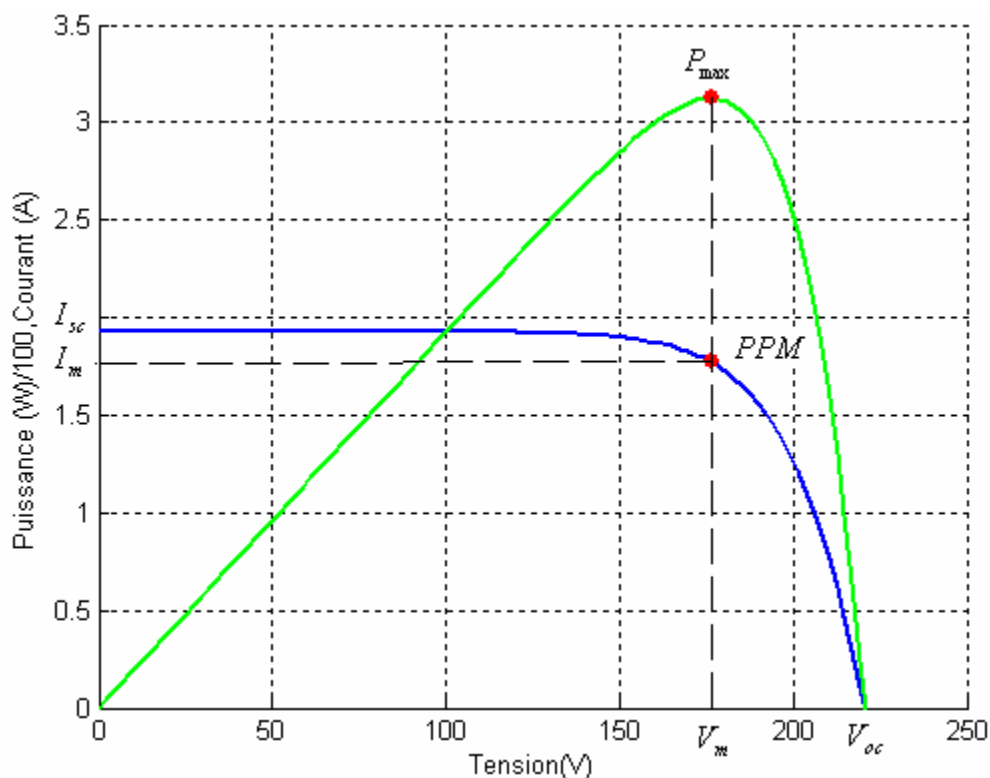
**Figure II-7-a** La caractéristique  $P(V)$  du GPV effet éclairement



*Figure II-7-b* La caractéristique  $P(V)$  du GPV effet température

## II-6-Principe de la recherche du point de puissance maximal

La conception de systèmes photovoltaïques optimisée est assez difficile. En effet, coté source pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température. Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source-charge dans des conditions données, c'est-à-dire au point de puissance maximale de la caractéristique puissance en fonction de la tension représentée à la figure (II-8) à éclairement  $800W/m^2$  et la température  $25^{\circ}C$ .

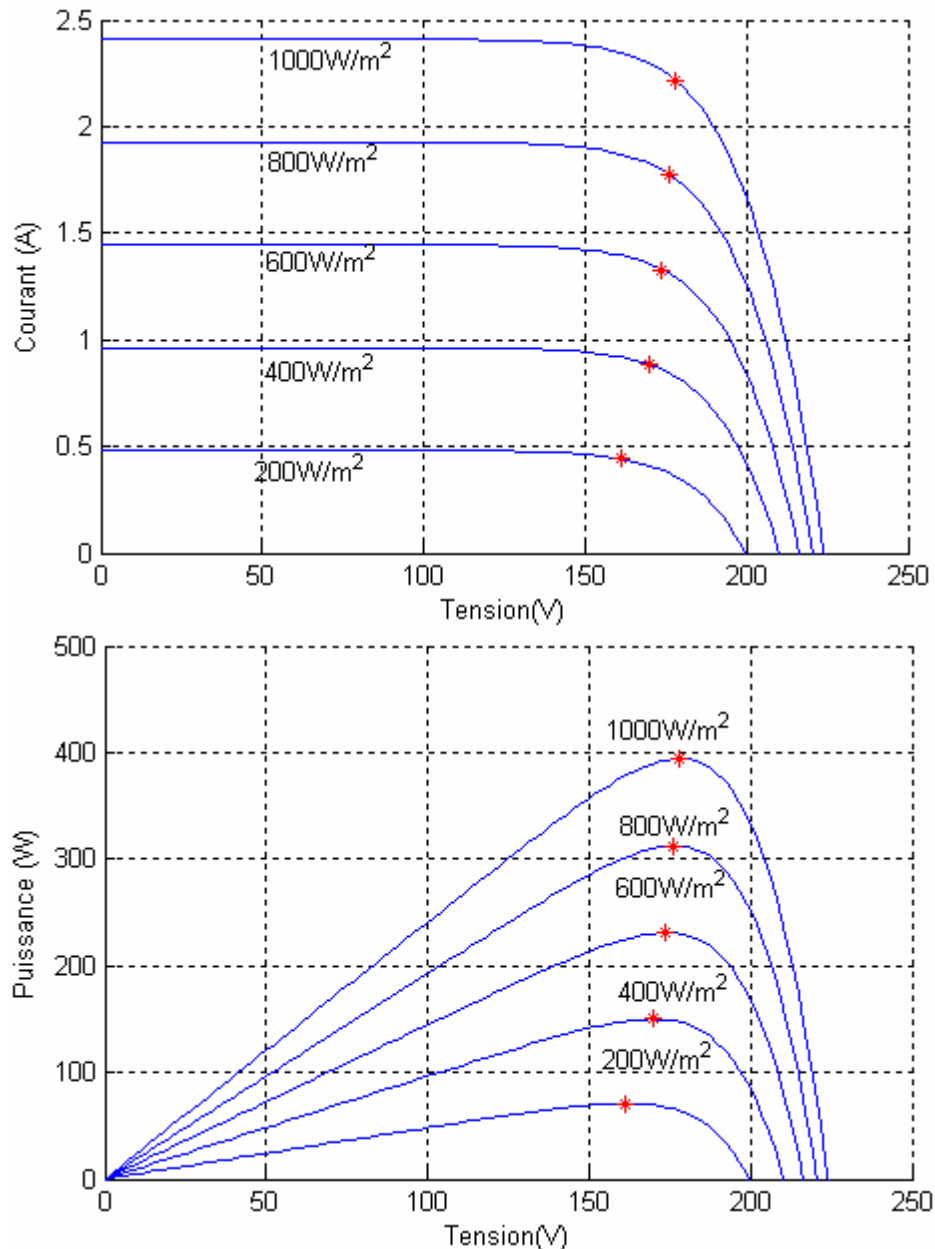


**Figure II-8** Caractéristique courant/ tension / puissance d'un panneau PV

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur PV à son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques [14].

La puissance de fonctionnement du générateur PV est facilement calculée à partir du produit tension-courant. Par contre, la détermination de la puissance maximale de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des conditions climatiques (éclairage, température). Cette référence, étant alors non constante et étant caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser.

Afin de surmonter ces difficultés, plusieurs méthodes sont souvent adoptées telles que les méthodes analogiques et les méthodes numériques.



**Figure II-9** La caractéristique  $I(V)$ ,  $P(V)$  et PPM

### II-6-1- Les algorithmes du point de puissance maximale

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT. Nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ (P&O), l'incrément de conductance (IncCond) et par intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones) [14].

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement

de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte. Ces méthodes, aujourd'hui largement utilisées de par leur facilité d'implémentation, présentent cependant quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elles engendrent en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement.

La technique de contrôle nommée Hill Climbing, consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au convertisseur statique. Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque  $dP_{pv}/dD$  est forcé à zéro par la commande.

Les commandes basées sur la logique floue sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs. L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités.

La technique des réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système.

### **II-7- Principe de la commande MPPT**

La commande *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*) est un organe fonctionnel du système *PV* et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur *PV* dans des conditions météorologiques et de charge stables. Que ce soit une commande analogique ou digitale [17], le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $D$  à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau *PV*.

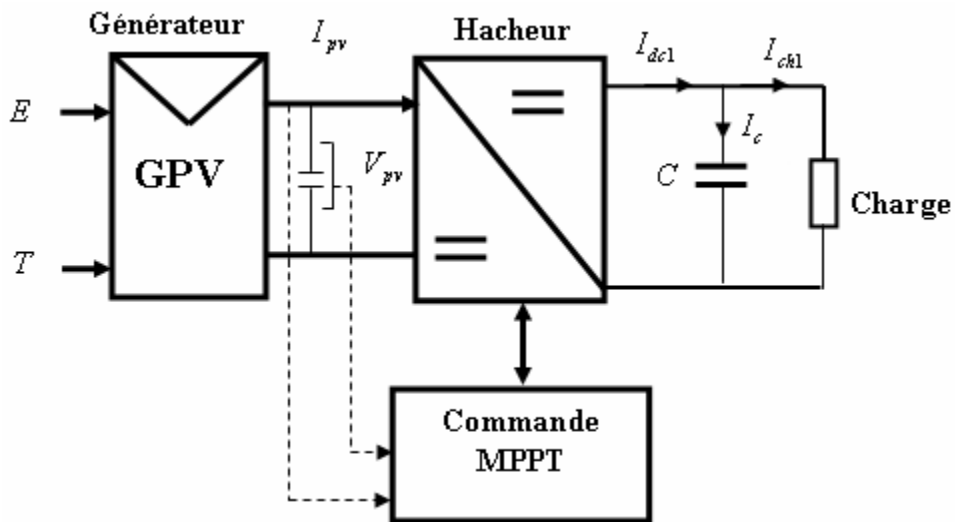


Figure II-10 Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT

## II-8- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une description générale des différentes parties du système de conversion photovoltaïque. Dans un premier temps, nous avons commencé l'étude par détailler les caractéristiques d'un GPV ; ensuite, une présentation du modèle des éléments constituant la chaîne photovoltaïque avec les implications sur le rendement d'une installation PV de la caractéristique non linéaire de ce générateur sont fournis. Nous avons également montré comment nous pourrions optimiser la puissance fournie par le GPV par le biais d'un étage d'adaptation avec fonction de recherche du point de puissance maximale MPPT.

### III-1- Introduction

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. Le schéma bloc de l'éolienne étudiée dans ce travail est présenté dans la figure (III-1).

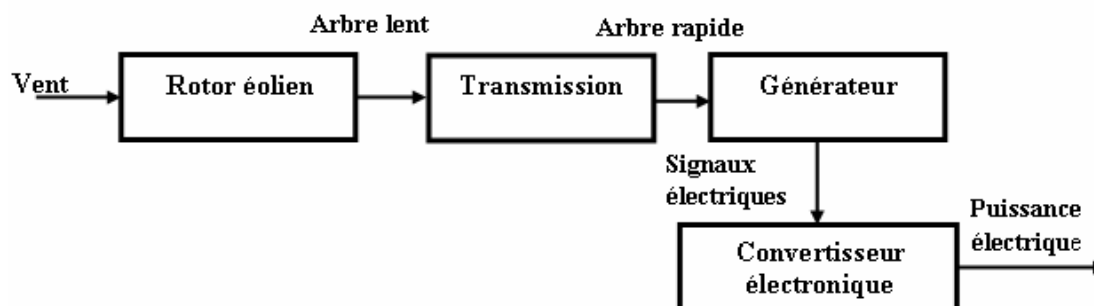


Figure III-1 Structure du système de conversion éolien

### III-2- Modélisation du générateur éolienne

Le générateur éolien, constitué d'une turbine à vitesse variable couplée à une génératrice synchrone à aimants permanents à travers un multiplicateur et raccordée à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance, est représenté sur la figure (III-2). La modélisation et la commande de ces différents organes seront développées par suite.

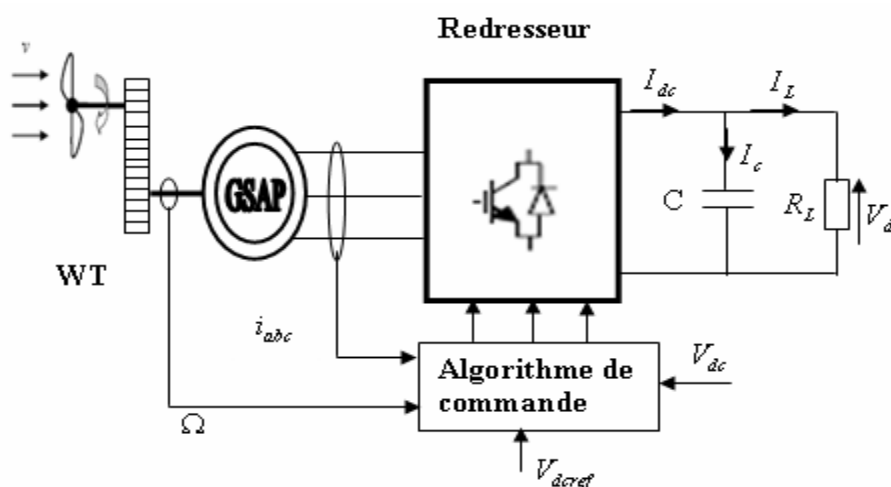


Figure III-2 Structure du générateur éolien étudié

### III-2-1- Modèle du vent

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance et du système de commande. Le vent est la variable d'entrée du système éolien. Sa mesure exacte à la hauteur du moyeu est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur stochastique définie par des paramètres statistiques. La modélisation du vent a déjà fait l'objet de nombreux travaux et par conséquent, elle ne sera pas détaillée dans ce travail. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$V_v = f(t) \quad \text{(III-1)}$$

La vitesse du vent sera modélisée, dans cette partie, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$V_v = 1 + \sum_{n=1}^i a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t) \quad \text{(III-2)}$$

### III-2-2- Modèle de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par [19] :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad \text{(III-3)}$$

Avec:

$\rho$  : est la masse volumique de l'air ( $kg \cdot m^{-3}$ ).

$V_v$ : est la vitesse du vent ( $m/s$ ).

$S$  : est la surface traversée par le vent ; sa surface utile est donnée par l'expression (III-4) selon la figure (III-3) :

$$S = 2R \cdot H \quad \text{(III-4)}$$

Avec :  $R$  représentant le rayon de la voilure ( $m$ ) et  $H$  sa hauteur ( $m$ ).

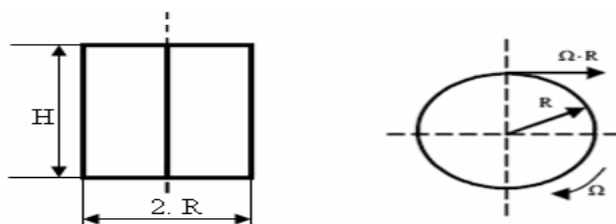


Figure III-3 Dimensionnement géométrique de la voilure Savonius

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité [20]. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est fournie par la limite de Betz:

$$P_{max} = 16/27 \cdot P_v = 0,59 \cdot P_v \quad (III-5)$$

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. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini par :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} = 0,59 \quad (III-6)$$

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 par :

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{eol}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \quad (III-7)$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée : la vitesse réduite (spécifique)  $\lambda$  qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent est donnée par:

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_v} \quad (III-8)$$

Avec:  $\Omega$  la vitesse de rotation des pales (*rad/s*).

Selon la caractéristique propre de la voilure  $C_p(\lambda)$  de l'équation (III-7) la puissance éolienne est calculée ainsi :

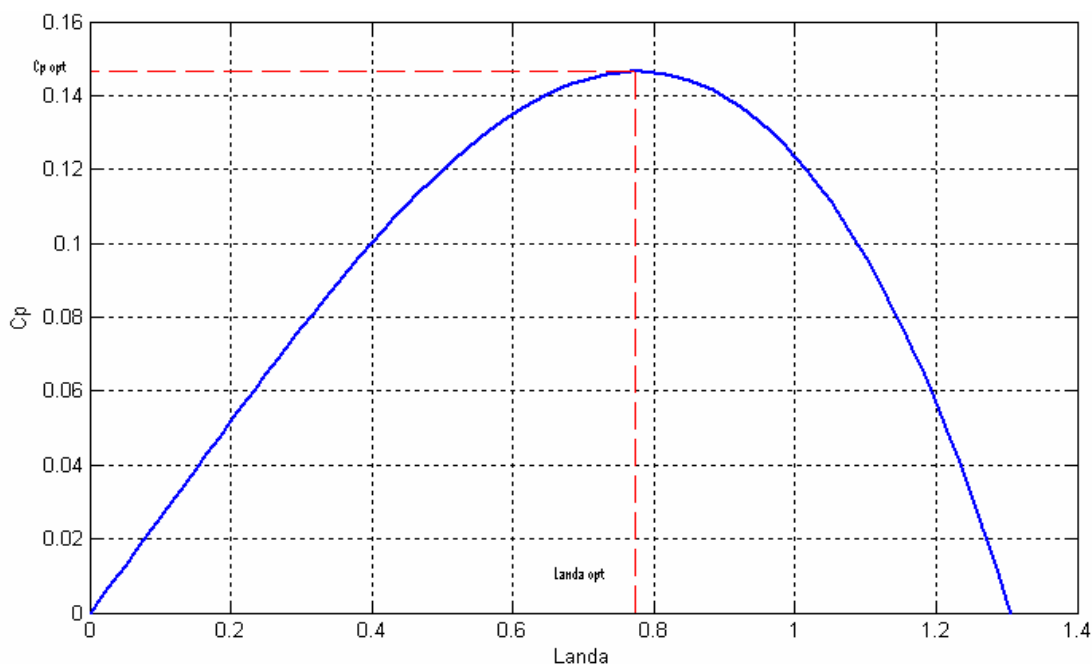
$$P_{eol} = 1/2 \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (III-9)$$

L'équation analytique de  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  résultant de l'interpolation, est donnée par :

$$C_p(\lambda) = -0,2121 \cdot \lambda^3 + 0,0856 \cdot \lambda^2 + 0,2539 \cdot \lambda \quad (III-10)$$

La figure (III-3) présente le tracé de la caractéristique. Il apparaît un maximum pour une vitesse réduite de 0.78. Afin d'optimiser la conversion de puissance, il faut

essayer de conserver cette vitesse réduite, soit modifier la vitesse de rotation lorsque la vitesse du vent varie.



**Figure III-4** Courbe  $C_p(\lambda)$  de la voilure étudiée de type Savonius

A partir de cette puissance, le couple éolien est donc donné par :

$$C_{eol} = \frac{P_{eol}}{\Omega} \quad (III-11)$$

Si, en remplaçant la valeur de la puissance par le produit couple – vitesse et en utilisant l’expression (III-8) de la vitesse réduite, on obtient :

$$C_{eol} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot R^2 \cdot H \cdot V_v^2}{\lambda} \quad (III-12)$$

Les figures (III-5 et III-6) présentent un réseau de caractéristiques respectivement de puissance et couple éolienne en fonction de la vitesse de rotation, le paramètre étant la vitesse du vent.

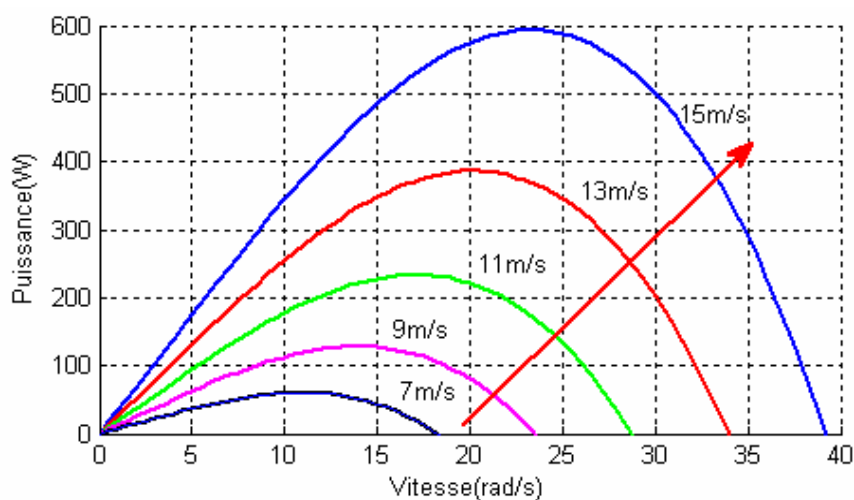


Figure III-5 Caractéristiques  $P_{eol}(\Omega)$

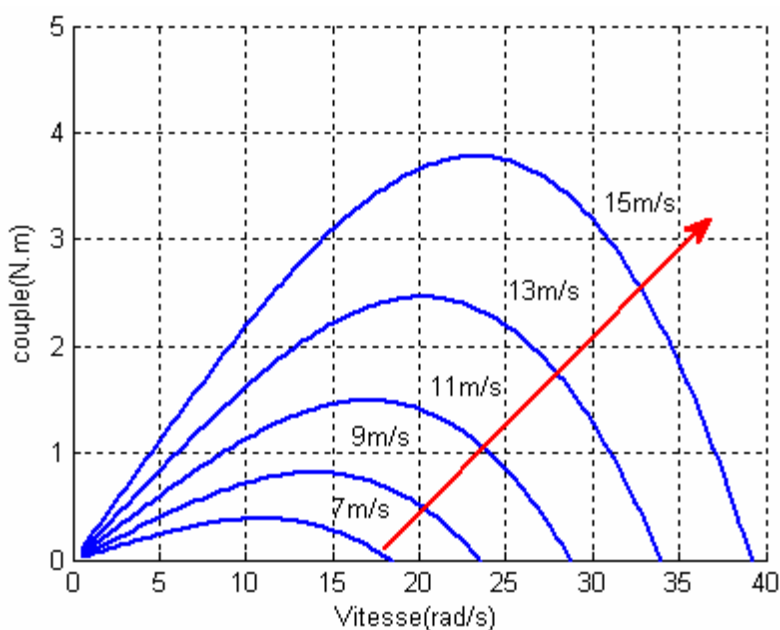


Figure III-6 Caractéristiques  $C_{eol}(\Omega)$

### III-2-3- Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante [20].

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{génératrice}}{G} \quad (III-13)$$

Avec : G gain de multiplicateur.

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur

$$C_{generateur} = \frac{C_{turbine}}{G} \quad (III-14)$$

### III-2-4- Modélisation de l'arbre de la machine

Plusieurs modèles mécaniques pour modéliser l'arbre sont proposés dans l'alittérature. Nous avons adopté un modèle simplifié qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne dans son ensemble [21].

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

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega}{dt} = C_{eol} - C_{em} - (f_m - f_t) \cdot \Omega \quad (III-15)$$

Avec :

$$J = J_t + G^2 J_m \quad (III-16)$$

$$f = f_t + G^2 \cdot f_m \quad (III-17)$$

$J_t, J_m$ : Inerties de la turbine et de la machine, resp.

$f_m$ : Coefficient de frottement de la machine

$f_t$ : Coef. de frottement des pâles

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

### III-3- Commande du générateur éolienne

Le schéma bloc de la commande du générateur éolien est représenté à la figure (III-7). La commande de ce système basée sur deux fonctions, l'algorithmique d'extraction du maximum de puissance (*MPPT*) et le contrôle du bus continue à la sortie de redresseur. Le principe de contrôle des courants par hystérésis est celui qui est utilisé dans le présent projet. Ce type de commande est robuste et facile à mettre en œuvre. Elle possède un bon temps de réponse en régime dynamique, une bonne stabilité et une bonne précision. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis.

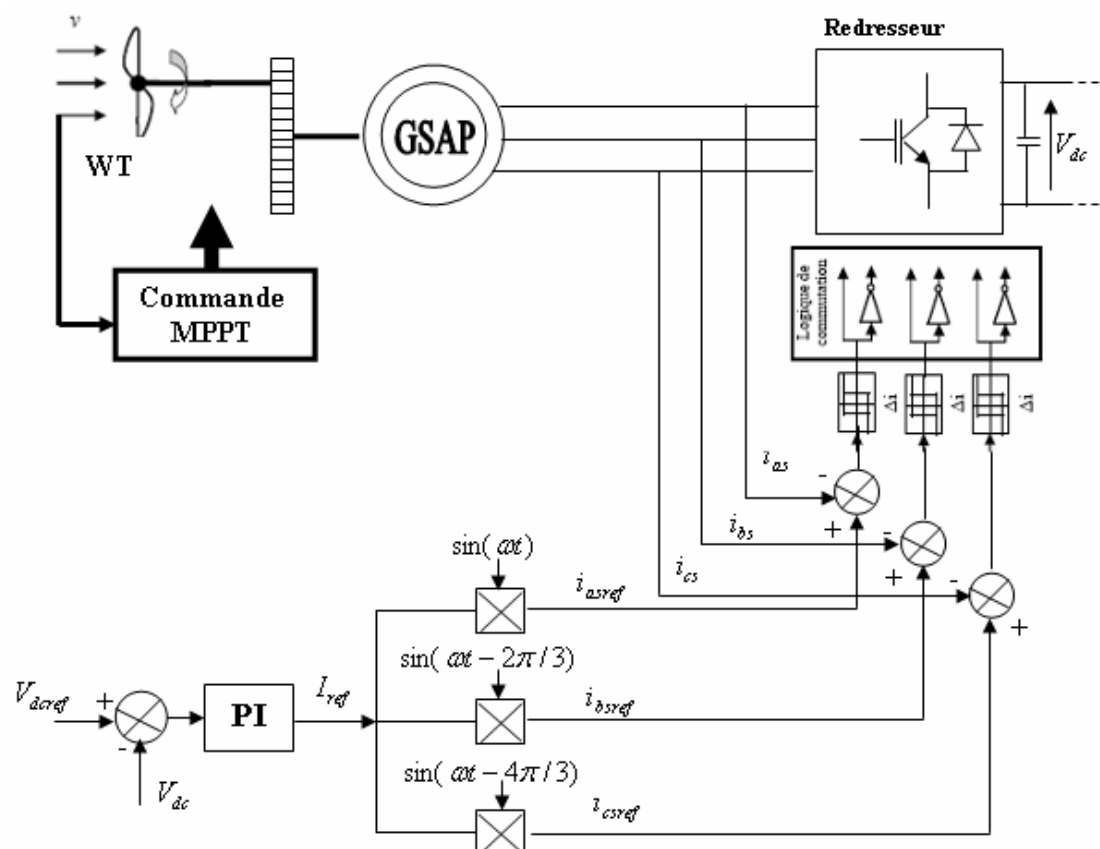


Figure III-7 Synoptique de la commande du redresseur et de la machine synchrone

### III- 3-1- Stratégie de maximisation de la puissance

Les équations de la puissance électrique et mécanique du système en régime permanent permettent à nouveau la formulation du nouvel objectif principal. Cependant, pour la fonction de la puissance mécanique, une forme plus simple est utilisée. Pour réduire les degrés de liberté du système, la vitesse du vent, seule variable non contrôlable du système, est sortie de la formulation mathématique par l'utilisation d'une forme optimale [22].

L'équation (III-9) donne la puissance correspondant à une vitesse de vent  $V_v$ :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot (\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{III-18})$$

Si le rapport de vitesse  $\lambda$  est maintenu à sa valeur optimale  $\lambda^{opt}$ , le coefficient de puissance est toujours à sa valeur maximale  $C_{pM} = C_p(\lambda^{opt})$ . Donc, la puissance de l'éolienne est aussi à sa valeur maximale :

$$P_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} \cdot C_{pM} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{III-19})$$

D'autre part, si de l'équation du rapport de vitesses supposé maintenu à la valeur

optimale on isole la vitesse de vent (III-20) pour la remplacer dans l'équation de la puissance mécanique maximale (III-19), on obtient l'équation (III-21).

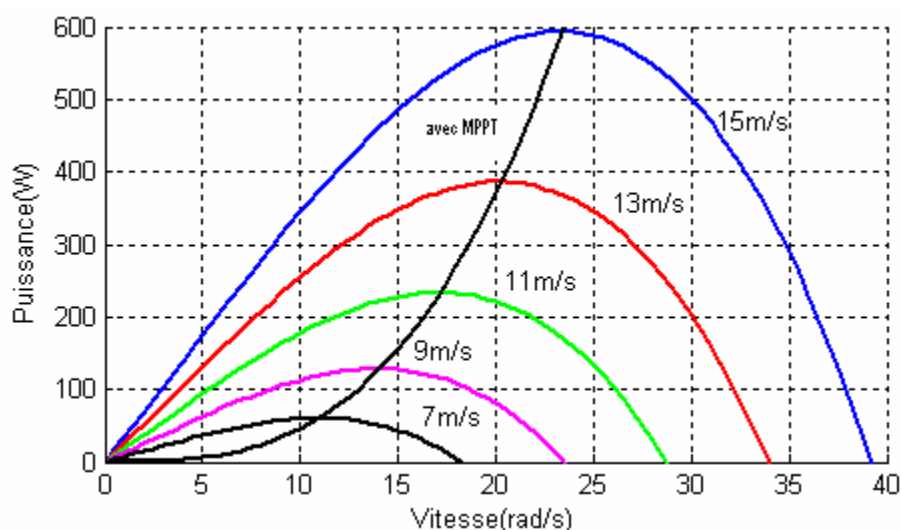
$$\lambda^{opt} = \frac{\Omega R}{V_v} \Rightarrow \frac{R}{\lambda^{opt}} \cdot \Omega \quad (III-20)$$

$$P_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} \cdot C_{pM} \cdot \rho \cdot S \cdot \left( \frac{R}{\lambda^{opt}} \right)^3 \Omega^3 \quad (III-21)$$

On obtient donc une forme analytique de la puissance mécanique maximale de la turbine éolienne en fonction de sa vitesse de rotation  $\Omega$  uniquement. En considérant que les conditions sont optimales (à puissance optimale) alors l'équation (III-21) permet le calcul de la valeur du couple optimal :

$$C_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} C_{pM} \rho S \left( \frac{R}{\lambda^{opt}} \right)^3 \Omega^2 \quad (III-22)$$

La figure (III-8) présente un réseau de caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation où la courbe noire représente les lieux de la puissance optimale, ce qui correspond à l'équation (III-21).



**Figure III-8** Caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation

### III-4- Conclusion

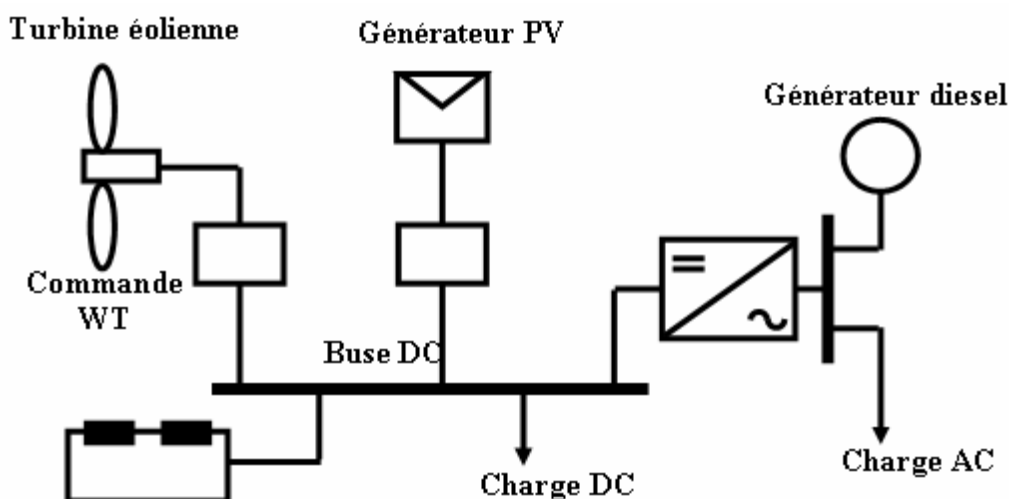
Dans ce 4ème chapitre, nous avons présenté les modèles mathématiques des composantes du système de conversion d'énergie éolienne (modèles de la voile, de la machine synchrone à aimants permanents et du redresseur commandé). La loi commande du système a été aussi détaillée. Les résultats des différentes simulations réalisées ont été commentés et ont permis de valider les modèles mathématiques du système éolien.

### IV-1 Introduction

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

### IV-2- Systèmes Hybrides DC pour des Petites Communautés Isolées

La figure (IV-1) montre un système de petite puissance DC conventionnel avec une liaison en courant alternatif à travers un onduleur. La majorité de ces systèmes présente une structure où le bus DC de la batterie est le point central de connexion. En général, les petites éoliennes produisent de l'électricité en AC à fréquence variable, laquelle est redressée et appliquée au bus DC. Cette énergie est ensuite stockée ou reconvertie en AC (à amplitude et fréquence fixes) à travers un onduleur pour fournir de l'énergie à la charge.

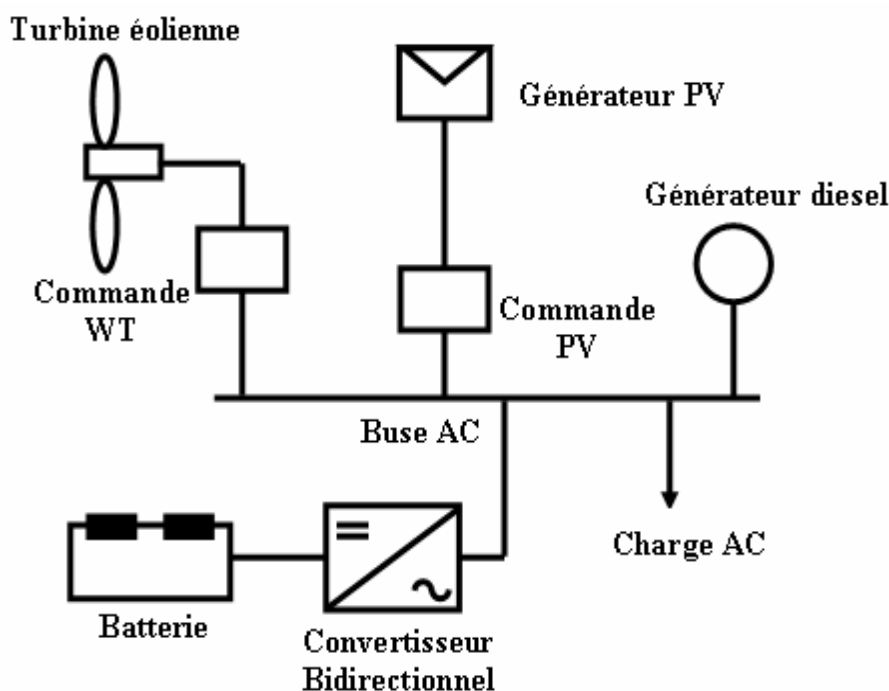


*Figure IV-1* Système hybride de puissance avec bus DC avec sources renouvelables et générateur diesel

### IV-3- Systèmes Hybrides AC pour des Petites Communautés Isolées

Dans cette topologie (mini-réseau), les différentes sources de production sont raccordées au bus commun de distribution en courant alternatif avec des onduleurs dédiés (Figure IV-2). De telles structures associent des composants de génération en DC ou en AC. La faisabilité technique et économique de cette structure est liée aux progrès des convertisseurs statiques et de leur commande. L'avantage principal est la modularité qui

permet la connexion et/ou le remplacement de modules de production en cas de besoin de plus d'énergie.



*Figure IV-2* Système hybride de puissance avec mini réseau avec sources renouvelables

#### IV-4- Convertisseurs

Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en courant alternatif et inversement. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les énergies renouvelables: les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs [23].

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le système de conversion des énergies renouvelables, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement. Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement: autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctionnements de redresseur et de l'onduleur sont réalisés par un seul appareil. Les hacheurs, le troisième type de convertisseur,

permettent de réaliser la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources.

Il existe trois types d'hacheur:

- hacheur dévolteur (ou série): ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $V_s$  est inférieur à celle de l'entrée  $V_e$ .
- hacheur survolteur (ou parallèle): ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $V_s$  est supérieur à celle de l'entrée  $V_e$ .
- hacheur série-parallèle: ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $V_s$  est inférieur ou supérieur à celle de l'entrée  $V_e$ .

#### **IV-5- Charge**

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système peuvent être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique, ce cas nécessite un onduleur.

#### **IV-6- Application du système hybride éolienne-photovoltaïque**

Le système hybride que l'on propose dans ce chapitre est constitué de deux sources d'énergies, photovoltaïque et éolienne, pour application aux zones éloignées.

Cette étude porte sur la modélisation et la simulation du couplage des deux chaînes en parallèle ensuite la modélisation des différents éléments constituant le système et le modèle final de l'ensemble de la chaîne.

#### **IV-7- Système de conversion d'énergie hybride**

Une fois tous les modèles élémentaires validés, nous avons effectué le couplage des deux chaînes, comme présenté sur la figure (IV-3). Certains aspects dimensionnels sont été empiriques ; d'autres points sont à étudier dans ce couplage, comme le niveau de la tension de la batterie.

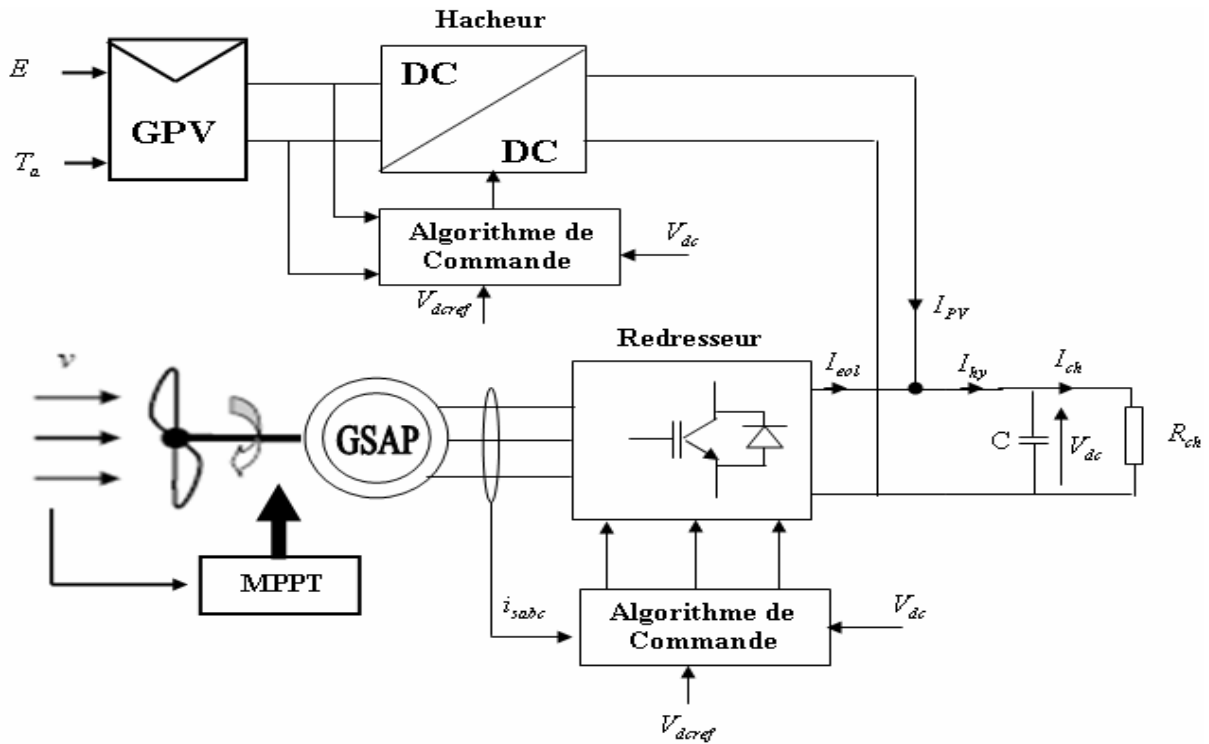


Figure IV-3 Schéma de principe du système hybride

IV-8- Résultats de simulations :

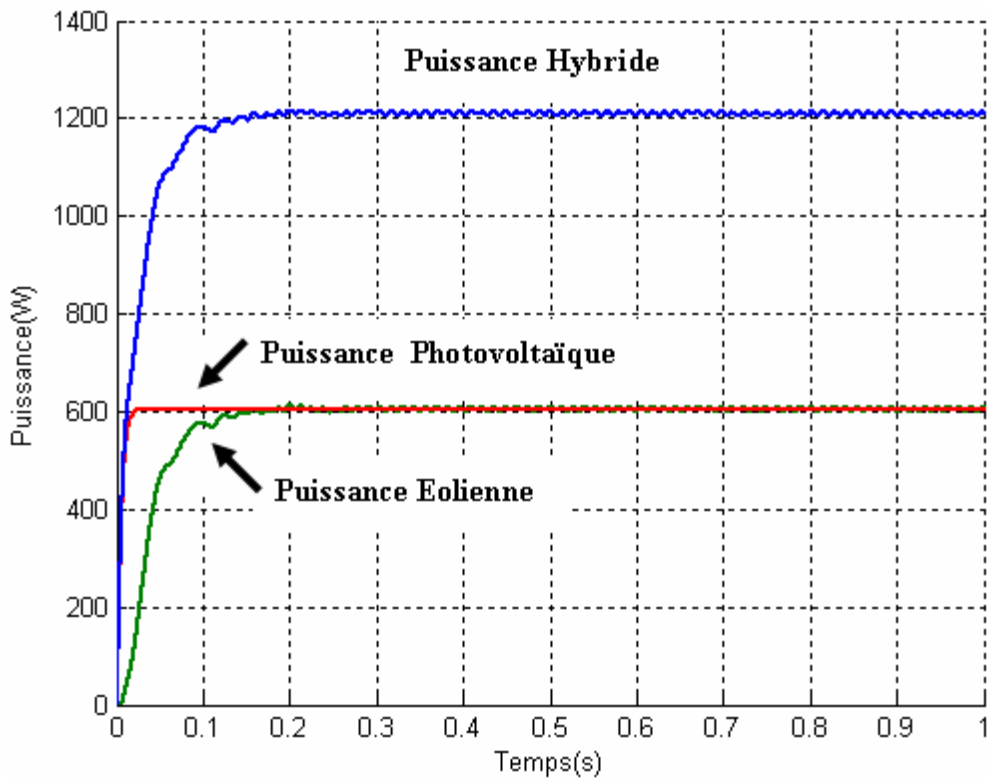


Figure IV-4 La puissance du système hybride en fonction du temps

La figure (IV-4) montre les résultats de simulation de la puissance du système hybride (éolienne - photovoltaïque) pour des conditions météorologiques moyennes (vitesse de vent 15 m/s, éclairement  $1000 \text{ W/m}^2$  et température  $25^\circ\text{C}$ ). La puissance du système hybride déterminée au cours de la mission est égale à la somme de la puissance éolienne extraite de l'énergie du vent et la puissance du générateur photovoltaïque extraite de l'énergie solaire.

#### **IV-9- Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté un système d'énergie hybride constitué par une éolienne associé à des panneaux photovoltaïques. Dans un premier temps, nous avons commencé l'étude par le modèle du générateur hybride, ensuite une présentation du modèle pour chaque élément constituant la chaîne hybride afin d'avoir un modèle complet de l'ensemble. Les résultats des différentes simulations réalisées sous environnement Matlab/Simulink ont été discutés.

## Conclusion Générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent les systèmes photovoltaïque-éolienne et l'association de ces deux sources renouvelables qui est nommé un système hybride.

Dans ce mémoire, on a fait la modélisation d'un générateur photovoltaïque ainsi que celui éolien et on a vu l'avantage d'un système hybride pour augmenter l'énergie d'électricité gratuite.

L'utilisation de l'énergie hybride (solaire-éolien) est de plus en plus utilisée dans diverses applications en sites isolés telles l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération ou le pompage. Son utilisation au niveau du pompage s'est répandue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes.

Ces travaux ont également dégagés des perspectives à plus long terme.

## Annexe

### Pièce d'identité du module AEG-40

Le module AEG-40 est l'élément constitutif de notre générateur photovoltaïque. Il est constitué de 35 cellules carrées au silicium monocristallin, où chaque photopile présente 10 cm de côté. Ce module possède les caractéristiques suivantes fournies par le constructeur à 1000 (w/m<sup>2</sup>) et 25 °C :

- Puissance crête = 38.4 W.
- Courant de court-circuit  $I_{sc} = 2.41$  A.
- Tension à circuit ouvert  $V_{oc} = 22.4$  V.
- Courant optimum  $I_m = 2.2$  A.
- Tension optimale = 17.45 V.
- Résistance série  $R_s = 0.45$  Ω.
- Le nombre de cellules solaires en série  $N_s = 36$ .
- Coefficient de variation du courant en fonction de la température = 0.6 % / °C.
- Coefficient de variation de la tension en fonction de la température = 0.4 % / °C.

### Paramètres de l'éolienne – Turbine Savonius

- Rayon de la voileure  $R = 0,5$  m.
  - Hauteur de la voileure  $H = 2$  m.
  - Surface active  $S = 2$  m<sup>2</sup>.
  - Vitesse réduite optimale  $\lambda = 0.78$
  - Inertie de la voileure 16 kg.m<sup>2</sup>.
  - Coefficient de puissance optimal  $C_p = 0.15$ .
  - Masse volumique de l'air 1.2 kg.m<sup>-3</sup>.
-

### Paramètres de la GSAP

- Tension nominale :  $V_n = 90 \text{ V}$ .
  - Puissance nominale  $P_n = 600 \text{ W}$ .
  - Courant nominale  $I_n = 4.8 \text{ A}$ .
  - Nombre de paires de pôles  $2p = 4$ .
  - Résistance des enroulements :  $R_s = 1.4 \Omega$ .
  - Inductance synchrone  $L_s = 0.0263 \text{ H}$ .
  - Flux efficace  $\Phi_{eff} = 0 \text{ Wb}$ .
-

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] B. Multon, " Production d'énergie électrique par sources renouvelables", *Techniques de l'Ingénieur Traité, D 4005*.
- [2] C. Alonso, " Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie", *Mémoire en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger les recherches, université Paul Sabatier Toulouse III, Décembre 2003*.
- [3] O. Gergaud, " Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", *Docteur de l'École Normale Supérieure de Cachan 2002*.
- [4] B. Robyns, P. Bastard, "Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques", *La revue 3EI n°39, Décembre 2004*.
- [5] Recherche ECRIN entreprise, " L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables", *rapport de synthèse, mai 2002*.
- [11] S. Petibon, " Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", *Thèse de doctorat université Toulouse, 2009*.
- [7] B.Soltane, " Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ", *Thèse doctorat, Université de CONSTANTINE, 2010*.
- [8] Energies Renouvelables. <http://www.energies-renouvelables.org>.
- [9] E. Hau, "Wind-turbines, fundamentals, technologies, application, economics", *Editions Springer, 2000*.
- [10] M. Ivan "Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance" *Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM)*.
- [11] F. Poitiers, " Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne ", *thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003*.

## **BIBLIOGRAPHIE**

---

- [12] O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson, A. Larsson, "A Comparison of Electrical Systems for Variable Speed Operation of Wind Turbines ", *European Wind Energy Conf.*, 1994, p. 500-505.
- [13] C. Wagner Pereira. " L'énergie éolienne : Principe de fonctionnement, développement viable ". Mai – 2006.
- [14] A.Labouret, M.Villoz, " ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE ", DUNOD, Paris,2003,2005 ,269 p.
- [15] Y. Pankow, " Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque", Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'ENSAM ED432, 2004.
- [16] " Energie photovoltaïque " Guide d'énergie renouvelable 2002.
- [17] B. Azoui " Concept and realization of three-phase brushless DC motor (BLDCM) for solair application ", Thèse docteur d'état Es-science, 2002, University of Batna.
- [18] K. Kassmi1, M. Hamdaoui1 et F. Olivié, "Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique" *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°4 (2007) 451 – 462.
- [19] A. Mirecki " Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", thèse INP Toulouse, 2005.
- [20] S.El Aimani,"Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans réseaux de moyenne tension" thèse de Doctorat de l'Université Lille, France, 2004.
- [21] R.Cardenas-Dobson "Control of Wind Turbine Using a Switched Reluctance Generator" Thèse Doctorale à l'Université de Nottingham, 1996.
- [22] A. Mirecki, X. Roboam and F.Richardeau, "Architecture complexity and energy efficiency of small wind turbines" *IEEE Trans. On industrial electronics*, Vol. 54, No. 1, February 2007.
- [23] G. Siguier " L'électronique de puissance" Edition DUNOD 1990.