

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



Université Abderrahmane Mira-Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

# Mémoire de fin Cycle

En vue l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Energies renouvelables

## *Thème*

*Etude d'un système hybride (Eolien –  
Photovoltaïque)*

*Réalisé par :*

Mlle. MEZZAI Sonia  
Mlle. TADJINE Katia

*Encadré par :*

M<sup>me</sup>. D. REKIOUA  
Mr. A. MOHAMMEDI

*Promotion Juin 2015*

## Remerciements

---

*Tout d'abord, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes les années d'études, et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Nous tenons à représenter nos vifs remerciements à notre promotrice M<sup>me</sup>. DJ.*

*REKIOUA professeur à l'université de Bejaia pour avoir accepté de nous encadrer, pour sa permanente gentillesse et pour ces précieux conseils tout au long de notre travail.*

*Nous remercierons profondément M<sub>r</sub>. N. MEZZAI pour son aide constante et bénéfique tout au long de notre travail, sans oublier M<sub>r</sub>. A.MOHAMMEDI pour tout le temps qui nous a consacré.*

*Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepter de juger notre travail.*

## Dédicaces

---

### Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes parents, à ma précieuse maman HOURIA qui grâce à elle je suis arrivée*

*là ou j'en suis aujourd'hui, à mon papa MOHAMED*

*A mon frère bien aimé AZZEDINE*

*A ma très chère sœur FERIEL*

*A toute personne qui m'est cher au cœur.*

*Katia*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à Mes très chers parents symbole de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel, que dieu les protègent pour moi leur accordent une bonne santé et une longue vie.*

*A mon marie ;*

*A tout mes frères et sœurs ;*

*Je dédie ce modeste travail à mes beaux parents et mes belles sœurs ;*

*A toute ma famille ;*

*A Katia Tadjine ainsi que toute sa famille ;*

# *Sommaire*

# Sommaire

---

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## **Chapitre I : Etat de l'art sur les énergies renouvelables**

I. 1. Introduction.....	3
I. 2. Généralités sur les systèmes photovoltaïques .....	3
I. 2. 1. Historique .....	3
I. 2. 2. Cellule photovoltaïque .....	4
I. 2. 2. 1 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque .....	4
I. 2. 2. 2. Caractéristique de la cellule photovoltaïque.....	5
I. 2. 2. 3. Influence de la température .....	6
I. 2. 2. 4. Influence de l'éclairement .....	7
I. 2. 3. Association des cellules photovoltaïques.....	8
I. 2. 4. Systèmes photovoltaïques .....	9
I. 2. 4. 1. Systèmes autonomes .....	9
I. 2. 4. 2. Systèmes raccordés au réseau .....	9
I. 2. 5. Avantages et inconvénients des générateurs photovoltaïques .....	10
I. 3. Généralités sur les systèmes éoliens .....	10
I. 3. 1. Historique.....	11
I. 3. 2. Différents types d'aérogénérateurs .....	11
I. 3. 2. 1. Eoliennes à axe vertical .....	11
I. 3. 2. 2. Eoliennes à axe horizontal .....	12
I. 3. 3. Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur .....	13
I. 3. 4. Puissance récupérable par une éolienne. ....	14
I. 3. 5. Régulation mécanique de la vitesse d'une éolienne .....	16
I. 3. 6. Machines électriques dans les aérogénérateurs .....	17
I. 3. 7. Avantages et inconvénients des générateurs éoliens .....	18
I. 4. Les convertisseurs statiques.....	19
I. 4. 1. Convertisseur DC/DC (hacheur).....	19
I. 4. 2. Convertisseur DC/AC (onduleur) .....	19
I. 4. 3. Convertisseur AC/DC (Redresseur) .....	19

# Sommaire

---

I. 5. Les batteries .....	19
I. 6. Généralités sur Les systèmes électriques hybrides SEH .....	20
I. 6. 1. Configuration du bus dans les systèmes hybrides .....	20
I. 6. 1. 1. Architecture à bus continu CC .....	21
I. 6. 1. 2. Architecture à bus alternatif AC .....	21
I. 6. 2. Avantages et inconvénients d'un système hybride .....	22
I. 7. Groupe moteur-pompe .....	22
I. 7. 1. Moteur .....	22
I. 7. 2. Pompe .....	23
I. 8. Système hybride étudié .....	25
I. 9. Conclusion .....	26

## **Chapitre II : Modélisation des composants du système hybride**

II. 1. Introduction .....	27
II. 2. Structure de la chaine de conversion photovoltaïque .....	27
II. 3. Modélisation du générateur photovoltaïque .....	27
II. 4. Optimisation de la puissance des modules PV .....	30
II. 4. 1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O) .....	30
II. 4. 2. Méthode de conductance incrémentale .....	32
II. 5. Modèle d'un hacheur survolteur (Boost) .....	33
II. 6. Modélisation de la batterie .....	35
II. 7. Structure de la chaine de conversion éolienne .....	36
II. 8. Modélisation de la chaine de conversion éolienne .....	36
II. 8. 1. Modélisation du vent .....	36
II. 8. 2. Modélisation de la turbine .....	37
II. 8. 3. Modèle du multiplicateur .....	37
II. 8. 4. Modèle de l'arbre de transmission .....	38
II. 9. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents .....	38
II. 10. Modélisation du redresseur PD3 à diodes .....	42
II. 11. Bus Continu .....	42
II. 12. Conclusion .....	43

# Sommaire

---

## **Chapitre III : Gestion de puissance du système hybride (éolien-photovoltaïque)**

III. 1. Introduction .....	44
III. 2. Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque.....	44
III. 2. 1. Résultats de simulation .....	44
III. 3. Simulation de la chaîne de conversion éolienne .....	47
III. 3. 1. Résultats de simulation.....	47
III. 4. Description du système hybride étudié .....	53
III. 4. 1. Résultat de simulation .....	54
III. 5. Conclusion.....	59

## **Chapitre IV : Etude d'un système d'énergie hybride appliqué au pompage**

IV. 1. Introduction .....	60
IV. 2. 1. Description de la carte d'acquisition de données .....	60
IV. 2. 2. Caractéristiques de la carte d'acquisition de donnée .....	60
IV. 2. 3. Software de la carte d'acquisition de données .....	61
IV. 2. 4. Le concept d'instrument virtuel .....	61
IV. 3. Modèles mathématiques du système de pompage hybride .....	61
IV. 3. 1. Modèles mathématiques de la pompe .....	61
IV. 3. 2. Données de base.....	62
IV. 3. 2. 1. Le Débit .....	62
IV. 3. 2. 2. La Hauteur manométrique totale.....	62
IV. 3. 2. 3. Le Niveau statique .....	63
IV. 3. 2. 4. Le Niveau dynamique .....	63
IV. 4. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.....	63
IV. 5. Calcul de l'énergie journalière requise .....	63
IV. 6. Description du système de pompage étudié .....	64
IV.6.1. Résultats de simulation .....	64
IV. 7. Conclusion .....	69

<b>Conclusion générale</b> .....	70
----------------------------------	----

## **Références bibliographiques**

## **Annexes**

# *Liste des figures*

**Listes de figures :****Chapitre I :**

<b>Figure I.1 :</b> Principe de fonctionnement d'une cellule PV .....	5
<b>Figure I.2 :</b> Caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule .....	5
<b>Figure I.3 :</b> Caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau PV .....	5
<b>Figure I.4 :</b> Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	6
<b>Figure I.5 :</b> Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	6
<b>Figure I.6 :</b> Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	7
<b>Figure I.7 :</b> Caractéristique puissance-tension pour différents ensoleillements.....	7
<b>Figure I.8 :</b> Cellules ou modules photovoltaïques en série .....	8
<b>Figure I.9:</b> Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle .....	8
<b>Figure I.10 :</b> Eolienne à axe vertical la Savonius.....	12
<b>Figure I.11 :</b> Eolienne à axe vertical la Darrieus.....	12
<b>Figure I.12 :</b> Eolienne à axe horizontal .....	13
<b>Figure I.13 :</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique .....	13
<b>Figure I.14 :</b> Vitesse de vent ( $V_v$ ) et vitesse tangentielle de l'aubage $R_t * \Omega_t$ .....	15
<b>Figure I.15 :</b> Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée .....	15
<b>Figure I.16 :</b> Courbe typique de puissance en fonction de la vitesse du vent .....	16
<b>Figure I.17 :</b> Architecture des systèmes hybrides d'énergie .....	20
<b>Figure I.18 :</b> Configuration du système hybride à bus continu.....	21
<b>Figure I.19:</b> Configuration du système hybride à bus alternatif.....	22
<b>Figure I.20:</b> Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge.....	24
<b>Figure I.21:</b> Courbes du couple et du débit d'une pompe volumétrique.....	25
<b>Figure I.22 :</b> Système hybride étudié .....	26

**Chapitre II :**

<b>Figure II.1 :</b> Différents constituants de la chaîne de conversion photovoltaïque.....	27
<b>Figure II.2:</b> Schéma équivalent d'une cellule solaire .....	28
<b>Figure II.3 :</b> Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire .....	31
<b>Figure II.4 :</b> Organigramme de la méthode perturbation et observation (PO) .....	31

**Figure II.5 :** Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe  $\frac{dP}{dV}$  sur la caractéristique de la puissance.....32

**Figure II.6 :** Organigramme de la méthode conductance incrémentielle.....33

**Figure II.7:** Circuit électrique du convertisseur DC-DC ..... 34

**Figure II.8:** Schéma d'un Hacheur survolteur à  $t \in [0, \alpha, T]$  ..... 34

**Figure II.9 :** Schéma d'un Hacheur survolteur à  $t \in [\alpha, T, T]$  ..... 35

**Figure II.10 :** Modèle R-C de la batterie..... 35

**Figure II.11 :** Structure de la chaîne de conversion éolienne36

**Figure II.12 :** Structure de la génératrice synchrone..... 39

**Figure II.13 :** Développement des enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe ( $dq$ ) ..... 39

**Figure II.14:** Redresseur PD3 à diodes ..... 42

**Figure II.15 :** Schéma d'un bus continu..... 42

**Chapitre III :**

**Figure III.1 :** Schéma bloc du système photovoltaïque ..... 44

**Figure III.2 :** L'allure du courant photovoltaïque ..... 45

**Figure III.3 :** L'allure de la tension photovoltaïque..... 45

**Figure III.4 :** L'allure de la puissance photovoltaïque..... 45

**Figure III.5 :** Tension de la batterie ..... 46

**Figure III.6 :** Etat de charge..... 46

**Figure III.7 :** Schéma bloc du système éolien ..... 47

**Figure III.8 :** Profil du vent admissible par la turbine [ $m/s$ ] ..... 47

**Figure III.9 :** Vitesse mécanique de la turbine [ $rad/s$ ]..... 48

**Figure III.10 :** Puissance mécanique de la turbine [ $W$ ] ..... 48

**Figure III.11 :** Coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine ..... 49

**Figure III.12 :** Coefficient  $\lambda$  de la turbine..... 49

**Figure III.13 :** Courant statorique à la sortie de l'éolienne avant le Zoom [ $A$ ] ..... 50

**Figure III.14 :** Courant statorique à la sortie de l'éolienne après le Zoom [ $A$ ] ..... 50

**Figure III.15 :** Tension statorique à la sortie de l'éolienne avant Zoom [ $V$ ] ..... 51

**Figure III.16 :** Tension statorique à la sortie de l'éolienne après Zoom [ $V$ ] ..... 51

**Figure III.17 :** Courant redressé [ $A$ ] ..... 52

<b>Figure III.18</b> : Tension aux bornes de la batterie [V].....	52
<b>Figure III.19</b> : Etat de charge de la batterie [%] .....	53
<b>Figure III.20</b> : Système hybride étudié .....	53
<b>Figure III.21</b> : Schéma bloc du système hybride .....	54
<b>Figure III.22</b> : Profil du vent.....	54
<b>Figure III.23</b> : Puissance de la turbine éolienne .....	55
<b>Figure III.24</b> : Variation temporelle de l'ensoleillement ( $W/m^2$ ) .....	55
<b>Figure III.25</b> : L'allure de la température [°C].....	56
<b>Figure III.26</b> : Puissance photovoltaïque du système .....	56
<b>Figure III.27</b> : L'allure de la puissance hybride .....	57
<b>Figure III.28</b> : L'allure de la puissance hybride et de la puissance de charge .....	57
<b>Figure III.29</b> : L'allure du courant de la batterie .....	58
<b>Figure III.30</b> : L'allure de la tension dans la batterie .....	58
<b>Figure III.31</b> : Etat de charge de la batterie .....	59
<b><u>Chapitre IV :</u></b>	
<b>Figure IV.1</b> : Carte d'acquisition de données.....	61
<b>Figure IV.2</b> : Système de pompage hybride étudié .....	64
<b>Figure IV.3</b> : Variation de l'éclairement en fonction de la température .....	65
<b>Figure IV.4</b> : Variation de l'éclairement en fonction du débit.....	65
<b>Figure IV.5</b> : Variation de l'éclairement en fonction du temps .....	65
<b>Figure IV.6</b> : Variation de l'éclairement en fonction du débit.....	66
<b>Figure IV.7</b> : Variation de l'éclairement en fonction du rendement de la pompe .....	66
<b>Figure IV.8</b> : Evolution des rendements de la pompe selon les différentes hauteurs .....	67
<b>Figure IV.9</b> : Evolution des débits de la pompe selon les différentes hauteurs .....	67
<b>Figure IV.10</b> : Tension photovoltaïque .....	68
<b>Figure IV.11</b> : Courant photovoltaïque .....	68
<b>Figure IV.12</b> : Tension éolienne .....	68
<b>Figure IV.13</b> : Courant éolienne.....	68
<b>Figure IV.14</b> : Tension de la batterie .....	69
<b>Figure IV.15</b> : Tension de l'onduleur .....	69
<b>Figure IV.16</b> : Courant de l'onduleur .....	69

*Liste des symboles et  
Abréviations*

**Liste de symboles et abréviations**

**Photovoltaïque :**

- $P_{opt}$  : La puissance optimale de la cellule [ $W$ ].
- $I$  : Le courant fournit par la cellule photovoltaïque [ $A$ ].
- $V$ : La tension continue donnée par la cellule photovoltaïque [ $V$ ].
- $I_L$  : Le photo-courant [ $A$ ].
- $I_R$  : Le courant traversant la résistance parallèle [ $A$ ].
- $I_D$  : Le courant traversant la diode [ $A$ ].
- $I_0$  : Le courant de saturation [ $A$ ].
- $R_s$  : La résistance série de la cellule [ $\Omega$ ].
- $R_p$  : La résistance parallèle de la cellule [ $\Omega$ ].
- $E_s$  : L'ensoleillement [ $W/m^2$ ].
- $E_{sréf}$ : L'ensoleillement de référence [ $W/m^2$ ].
- $T_j$ : La température de jonction de la cellule [ $^{\circ}C$ ].
- $T_{jréf}$  : La température de jonction de référence [ $^{\circ}C$ ].
- $T_a$  : La température ambiante [ $^{\circ}C$ ].
- $q$  : La charge d'électron  $e = 1.6 * 10^{-19} C$ .
- $K$  : La constante de Boltzmann ( $1.3854 * 10^{-23} JK^{-1}$ ).
- $A$ : Coefficient d'idéalité de la cellule.
- $N_{oct}$ : Température de fonctionnement nominal des cellules (Nominal operating cell temperature).
- $E_g$  : Energie de gap.
- $\alpha_{sc}$  : Représente un coefficient d'incrémentatation du courant  $I_{sc}$ .
- $B_{oc}$  : Représente un coefficient d'incrémentatation de la tension  $V_{oc}$ .
- $P\&O$  : Perturbation et d'observation.
- $MPPT$  : Maximum Power Point Tracking.

**Hacheur :**

- $V_e$  : La tension d'entrée [ $V$ ].
- $V_s$  : La tension de sortie [ $V$ ].
- $V_L$  : La tension aux bornes de l'inductance  $L$  [ $V$ ].

## Liste de symboles et abréviations

---

$I_R$  : Le courant traversant a charge [A].  
 $I_L$  : Le courant traversant l'inductance  $L$  [A].  
 $I_C$  : Le courant traversant le condensateur  $C$  [A].  
 $R$  : La résistance de la charge [ $\Omega$ ].  
 $T$  : La période de hachage.  
 $\alpha$  : Le rapport cyclique.

### **Batterie :**

$E_0$  : Source idéale de tension  
 $V_{bat}$  : La tension aux bornes de la batterie [V].  
 $V_{cbat}$  : La tension aux bornes du condensateur de la batterie [V].  
 $I_{bat}$  : Le courant traversant la batterie [A].  
 $R_s$  : La résistance série de la batterie [ $\Omega$ ].  
 $C_{bat}$  : La capacité nominale de la batterie [Ah].  
 $Q_{bat}$  : La quantité de charge manquante par rapport à  $C_{bat}$  [C].

### **Eolienne :**

$V_V$  : La vitesse du vent [m/s].  
 $P_V$  : La puissance du vent [W].  
 $P_t$  : La puissance de la turbine éolienne [W].  
 $\rho$  : La densité d'air [ $\text{Kg.m}^{-3}$ ].  
 $S=\pi R^2$  : La surface balayée par la turbine [ $\text{m}^2$ ].  
 $C_p$  : Le coefficient de puissance de l'éolienne.  
 $\lambda$  : La vitesse relative de la turbine éolienne [m/s].  
 $T_t$  : Le couple aérodynamique [N/m].  
 $T_{em}$  : Le couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone [N/m].  
 $T_{vis}$  : Le couple visqueux [N/m].  
 $G$  : Le gain du multiplicateur.  
 $\Omega$  : La vitesse mécanique de la génératrice [rad/s].  
 $\Omega_t$  : La vitesse de la turbine éolienne [rad/s].  
 $J$  : L'inertie totale de l'arbre de transmission.  
 $f$  : Coefficient de frottement visqueux.

### **Machine :**

$V_{Sa,Sb,Sc}$  : Les tensions des phases statoriques [V].

$i_{Sa,Sb,Sc}$  : Les courants statoriques [A].

$R_s$  : La résistance des phases statoriques [ $\Omega$ ].

$\phi_{Sa,Sb,Sc}$  : Les flux totaux à travers les bobines statoriques.

$I_{sd}, I_{sq}$  : Courants statoriques dans le repère de Park [A].

$V_{sd}, V_{sq}$  : Tensions statoriques dans le repère de Park [V].

$L_s$  : Inductance cyclique statorique [H].

$R_s$  : Résistance statorique [ $\Omega$ ].

$\phi_f$  : Flux inducteur créé par les aimants permanents [Wb].

$P$  : Nombre de paires de pôles.

$GS$  : Génératrices synchrones.

$GADA$  : Génératrices asynchrones à double alimentation.

$GAS$  : Génératrices asynchrones à cage.

$MSAP$  : Moteur synchrone à aimant permanent.

### **Redresseur PD3 :**

$V_{dc}$  : La tension redressée [V].

$V_m$  : La valeur maximale de la tension [V].

### **Bus continu :**

$i_{pv}$  : Courant fourni par le générateur photovoltaïque [A].

$i_{eol}$  : Courant fourni par le système éolien [A].

$i_c$  : Courant qui traverse la capacité [A].

$i_{hyb}$  : Courant produit par le système hybride éolien-PV [A].

$i_s$  : Courant de délestage [A].

$i_{bat}$  : Courant de la batterie [A].

### **Pompe :**

$P_h$  : Puissance communiquée au fluide par la pompe ( $W$ ).

$E_{ele}$  : Est habituellement exprimé en  $kWh$ .

$P_c$  : Pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites.

$a_i, b_i, c_i$  et  $d_i$  : Des constantes qui ne dépendent que du type du sous-système de pompage photovoltaïque.

$Q$  : Le débit d'eau de la pompe [ $l/h$ ] ou [ $m^3/j$ ].

HMT : La hauteur manométrique totale [ $m$ ].

$H_g$  : La hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation [ $m$ ].

$L$  : La distance des conduites [ $m$ ].

$d_c$  : Le diamètre des conduites [ $m$ ].

$N_s$  : Le niveau statique [ $m$ ].

$N_d$  : Le niveau dynamique [ $m$ ].

$C_h$  : La constante hydraulique.

# *Introduction générale*

### Introduction générale :

Une grande partie de la consommation mondiale d'énergie est assurée par les énergies d'origines fossiles (pétrole, gaz,...). La consommation excessive de ces ressources énergétiques limitées, conduit à l'épuisement progressif de ces réserves et intensifie les rejets de gaz à effet de serre et donc la pollution de l'atmosphère qui cause un changement climatique. Face à ces conséquences, il est nécessaire de prendre en considération le développement des énergies alternatives dites sources d'énergies renouvelables.

Le soleil, le vent, les chutes d'eau et la biomasse sont des ressources naturelles accessibles et exploitées pour générer de l'énergie électrique.

Leur flexibilité, leur simplicité d'utilisations et la multiplicité des domaines d'activités les ont rendues des énergies indispensables.

Pour un développement écologique et économique, la combinaison de ces sources d'énergie renouvelable pour avoir un système d'énergie hybride dit multi sources peut constituer une bonne alternative aux systèmes mono sources. Un système hybride (photovoltaïque – éolien) peut être très intéressant lorsque les conditions locales sont favorables du point de vue vent et ensoleillement [01].

Les périodes de l'année ayant une faible insolation correspondent à celles ayant un meilleur potentiel éolien. Il est donc évident qu'une complémentarité entre l'énergie éolienne et solaire est souhaitable et que le couplage de ces deux sources d'énergies avec des batteries de stockage est la solution la plus sûre et la moins coûteuse pour des systèmes autonomes [02].

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement de l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne. A cet effet, le système hybride d'origine renouvelable sélectionné pour notre étude est le système de pompage (éolien-photovoltaïque) avec stockage.

Le but de ce travail est l'étude d'un système hybride photovoltaïque/éolien avec des batteries de stockage. Pour cela, notre travail, sera structuré comme suit :

- Le premier chapitre présente une description des deux systèmes d'énergie renouvelable photovoltaïque-éolienne, ensuite nous avons procédé à la combinaison des deux sous-systèmes précédents pour former un système d'énergie hybride muni de batteries de stockage.

- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des composants du système hybride éolien-photovoltaïque, dans le but d'analyser son comportement dynamique face aux variations climatiques et celles de la charge.
- Dans le troisième chapitre, nous avons réalisé la gestion de puissance du système hybride (éolien-photovoltaïque).
- Le dernier chapitre concerne l'étude de performances d'un système hybride (éolien-photovoltaïque) appliqué au pompage.

# *Chapitre I*

*Etat de l'art sur les énergies  
renouvelables*

## I.1. Introduction

En vue de rendre l'approvisionnement en électricité plus écologique, les énergies renouvelables dont les sources sont illimitées et non polluantes ont vu le jour.

C'est le cas du photovoltaïque, de l'éolien, de la géothermie, de la biomasse et de la marémotrice.

Dans notre travail le système hybride étudié est celui qui combine les deux sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque/éolien) en utilisant des batteries de stockage. Ce système est fiable, économique et plus écologique comparé aux systèmes hybrides comportant des générateurs diesels à carburant fossiles dans le but de respecter l'environnement et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

## I.2. Généralités sur les systèmes photovoltaïques

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie des photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des cellules élémentaires fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs qui réalisent cette transformation d'énergie. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque, la mise en série et en parallèle de ce dernier forme un générateur photovoltaïque (GPV). La puissance extraite du générateur PV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule.

### I.2.1. Historique

Quelques dates de l'histoire du photovoltaïque :

- 1930 : les premières cellules PV à oxyde cuivreux ( $CuO$ ) ont été créées, suivies de cellules en sélénium ( $Se$ ).
- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé [03].

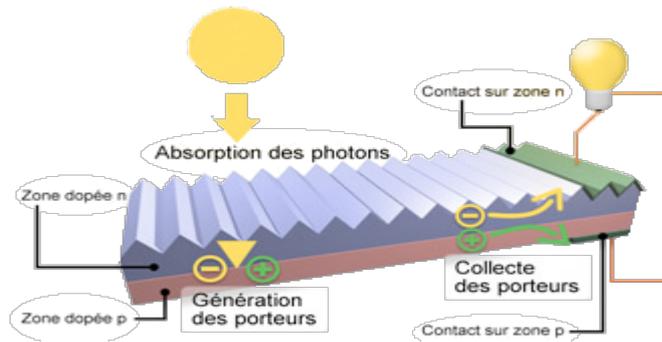
## I.2.2. Cellule photovoltaïque

### I.2.2.1. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement de cette cellule repose sur l'effet photovoltaïque, en effet une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur, ces deux couches sont dopées différemment :

- pour la couche N, apport d'électrons périphériques.
- pour la couche P, déficit d'électrons.

Ces 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 [04].

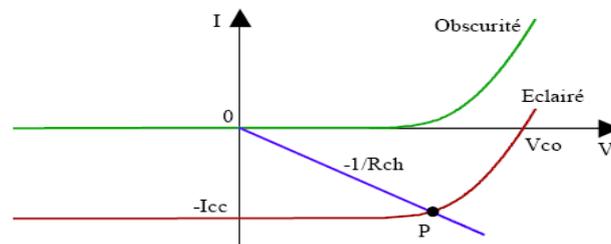


**Figure I.1** : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

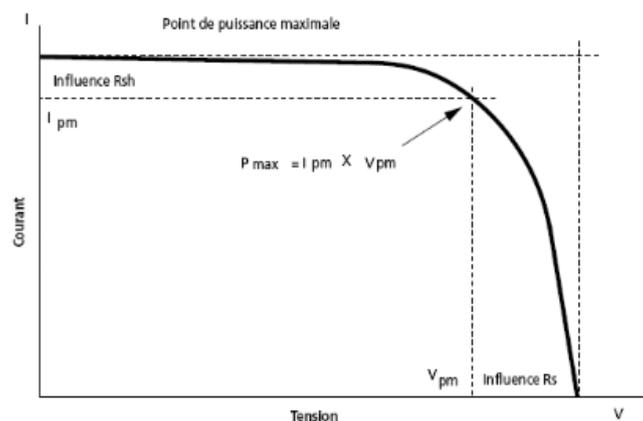
### I.2.2.2. Caractéristique de la cellule photovoltaïque

La cellule étant chargée par une résistance, lorsque l'on éclaire la jonction PN, on observe l'apparition d'un courant inverse  $I$  sous une tension en sens direct  $V$ . La jonction fonctionne en photopile, c'est l'effet photovoltaïque.

La caractéristique d'une jonction PN non éclairée est celle d'une diode. En présence d'un éclairage, elle joue le rôle d'un générateur de courant DC, dont la caractéristique est montrée à la figure (I.2) et (I.3).



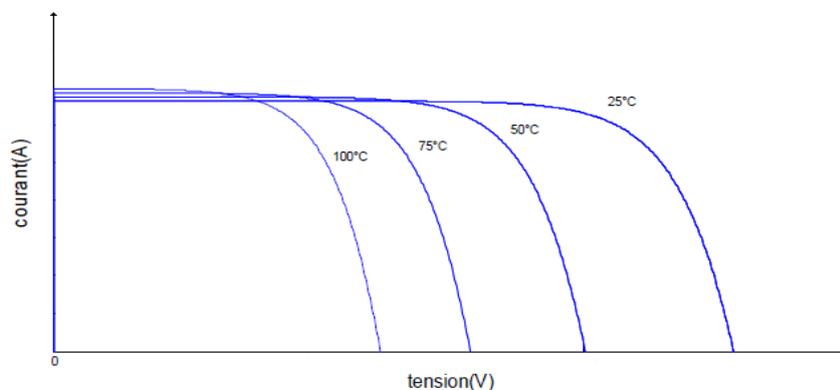
**Figure I.2** : Caractéristique  $I = f(V)$  d'une cellule.



**Figure I.3** : Caractéristique  $I=f(V)$  d'un panneau PV.

### I.2.2.3. Influence de la température

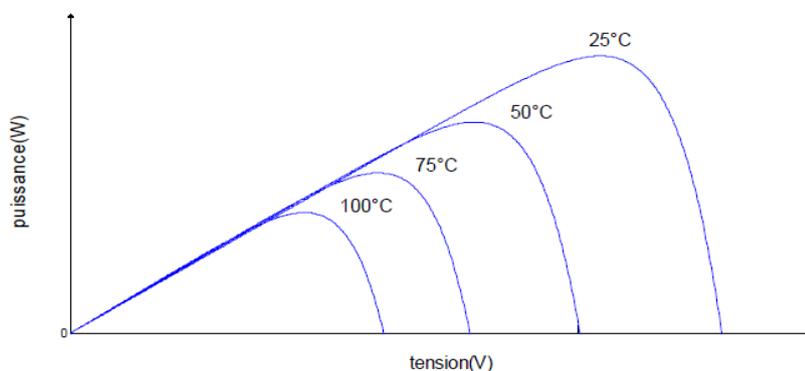
La figure (I.4) présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement d'un module photovoltaïque.



**Figure I.4** : Influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

On remarque que la température influe peu sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% pour chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25°C [05].

La figure (I.5) illustre la variation de la puissance délivrée par un module photovoltaïque en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température.

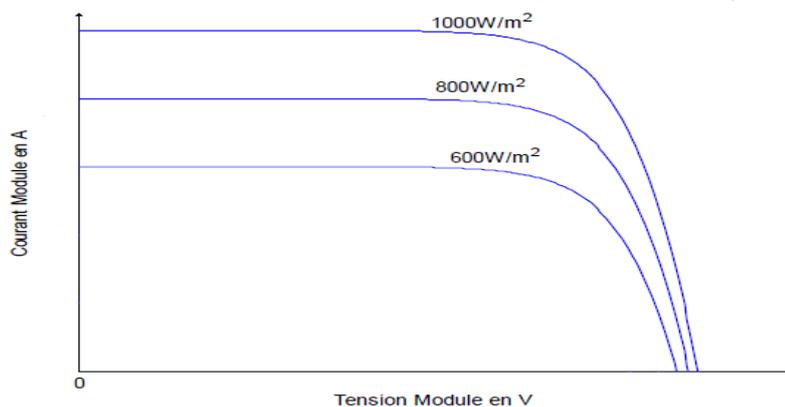


**Figure I.5** : Influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert a baissé assez fortement lorsque la température augmente. Par contre, le point de puissance maximale de chaque courbe diminue lorsque la température augmente.

#### I.2.2.4. Influence de l'éclairement

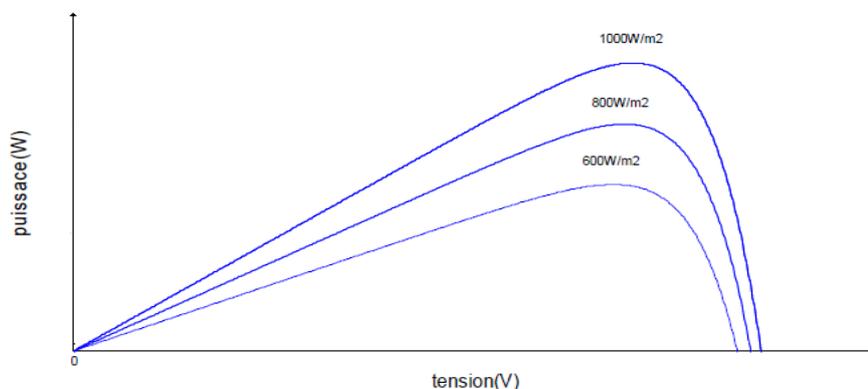
La figure (I.6) présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement.



**Figure I.6 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

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 la même proportion, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité de rayonnement de  $1000\text{W/m}^2$  à une température de  $25^\circ\text{C}$ . [05]

La figure (I.7) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement.



**Figure I.7 :** Caractéristique puissance-tension pour différents ensoleillements.

Il est clair 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, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule ( $P_{opt}$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairage.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

### I.2.3. Association des cellules photovoltaïques

#### ❖ Association en série

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. La figure (I.8) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en série [04].

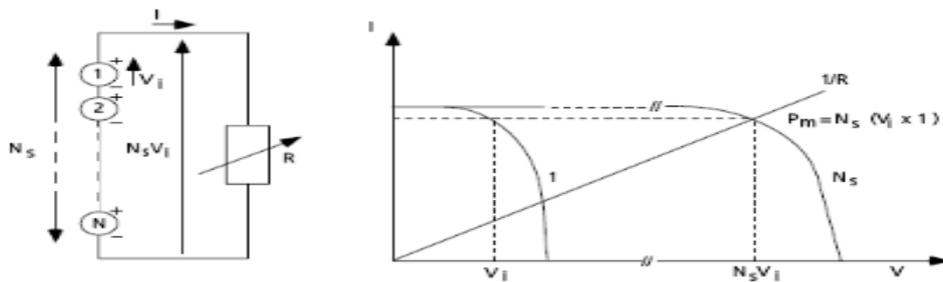


Figure I.8 : Cellules ou modules photovoltaïques en série.

#### ❖ Association en parallèle

En additionnant les 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. La figure (I.9) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en parallèle [04].

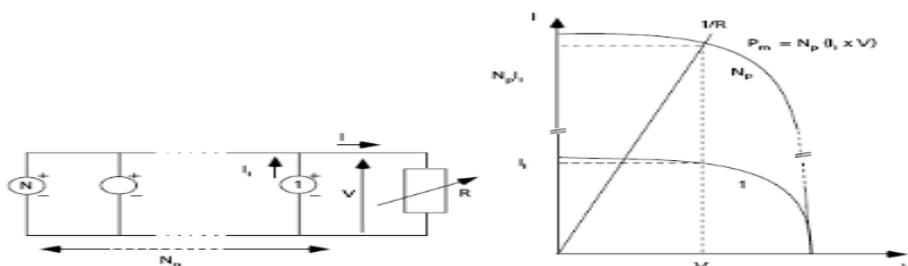


Figure I.9: Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle.

## I.2.4. Systèmes photovoltaïques

Bien qu'il existe une grande variété de systèmes photovoltaïques, on peut cependant les classer selon leurs connections au réseau de distribution de l'électricité conventionnel : les systèmes autonomes et les systèmes connectés au réseau de distribution électrique.

### I.2.4.1. Systèmes autonomes

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les champs dans les régions éloignées ainsi que le pompage de l'eau.

Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit [06].

- Des systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.
- Des systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage (au fil du soleil).

#### A. Systèmes autonomes avec stockage

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [05].

#### B. Systèmes autonomes sans stockage

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, c'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible.

### I.2.4.2. Systèmes raccordés au réseau

Les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes

d'électricité. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique [07].

### I.2.5. Avantages et inconvénients des générateurs photovoltaïques

#### ❖ Avantages

- La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains pour sa petite relative taille, et son opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montage dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville [08].

#### ❖ Inconvénients

- La production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, est toujours variable.
- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible [08].

### I.3. Généralités sur les systèmes éoliens

L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un dispositif mécanique dont l'intérêt se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent et de la transformer en énergie mécanique.

Cette énergie mécanique peut être exploitée de deux manières [09] :

- Soit la conservation de l'énergie mécanique pour faire avancer un véhicule (navire à voile), pour pomper de l'eau.
- Soit la transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome.

### I.3.1. Historique

L'énergie éolienne est l'une des plus vieilles énergies de la terre. Le vent fut utilisé pendant plusieurs siècles pour la propulsion des navires, jusqu'à ce que WATT ait inventé le moteur à vapeur dans le dix-huitième siècle [09].

Trois siècles Avant Jésus Christ, l'Égyptien HERO d'Alexandrie avait décrit une simple turbine éolienne à axe horizontal à quatre pales. Ce n'est qu'en 1890 au Danemark que les éoliennes seront utilisées pour créer de l'énergie électrique [10].

Malheureusement, le marché de l'énergie éolienne est freiné dans son développement pendant une grande partie du vingtième siècle en raison de la forte consommation de pétrole et de charbon. Dans les années 70, les premiers chocs pétroliers et l'augmentation brutale du prix des énergies fossiles redonnent un nouveau souffle à l'énergie éolienne [10].

### I.3.2. Différents types d'aérogénérateurs

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, les éoliennes sont classées en deux catégories :

- Eoliennes à axe vertical.
- Eoliennes à axe horizontal.

#### I.3.2.1. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles [11].

#### ❖ Savonius

Du nom de son inventeur, breveté en 1925. Son fonctionnement repose sur le principe de la trainée différentielle exercée par le vent sur ses godets comme montré sur la figure (I.10). Elle présente un grand nombre d'avantages à savoir un couple moteur important. Outre son faible encombrement, qui permet d'intégrer cette éolienne aux bâtiments sans en dénaturer l'esthétique [11].



**Figure I.10** : Eolienne à axe vertical la Savonius [11].

### ❖ Darrieus

Du nom de l'ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30. Ce type de rotor est généralement sous forme parabolique comme montré sur la figure (I.11). Son fonctionnement est basé sur la variation cyclique d'incidence ce qui fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles soit soumis à des forces d'intensités et de directions variables [11].



**Figure I.11** : Eolienne à axe vertical la Darrieus [11].

### I.3.2.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent comme montré sur la figure (I.12). Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux

contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie son efficacité [13].



Figure I.12 : Eolienne à axe horizontal [12].

### I.3.3. Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur

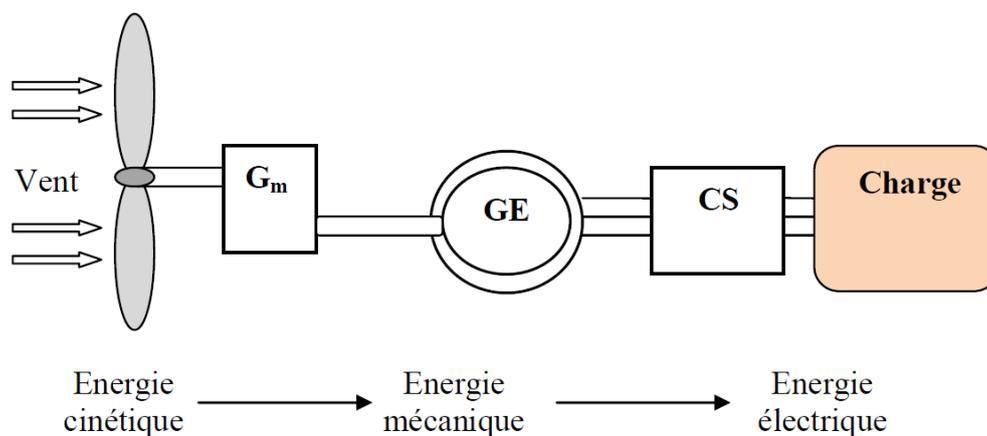


Figure I.13 : Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

$G_m$  : Multiplicateur de vitesse.

GE : Génératrice électrique.

CS : Convertisseur statique.

Les éoliennes assurent la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en trois étapes tel que montré sur la figure (I.13) :

- Les pales extraient une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

- La génératrice électrique reçoit l'énergie mécanique et la convertit ensuite en énergie électrique, qui sera ensuite transmise au convertisseur statique [32].
- Le convertisseur statique, qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge, adapte l'énergie électrique fournie par le générateur à la charge. Cette dernière peut être une résistance, un moteur, une pompe ou un réseau de distribution d'énergie électrique.

### I.3.4. Puissance récupérable par une éolienne

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme suivante : [14]

$$P_t = \frac{1}{2} * C_p * \rho * \pi * R_t^2 * V_v^3 \quad (\text{I.1})$$

Où :

$C_p$  : Est le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine ( $C_p$  ( $\lambda$ ) est la caractéristique propre de la turbine).

$\rho$  : Est la masse volumique de l'air ( $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ )

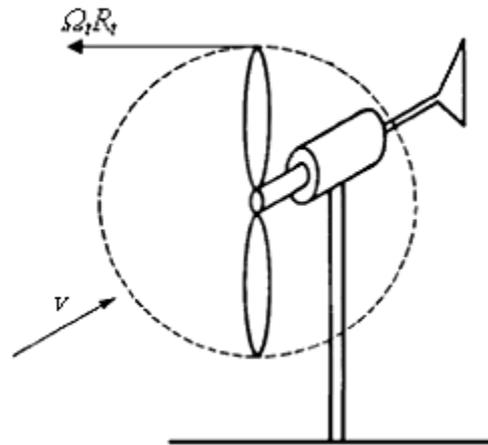
$R_t$  : Le rayon de la surface balayée(m).

$V_v$  : La vitesse instantanée du vent (m/s).

La valeur du coefficient de puissance  $C_p$  dépend de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse du vent. Elle peut avantageusement s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique ou normalisée  $\lambda$ .  $\lambda$  est le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent, comme la montre la figure (I.14) [14] :

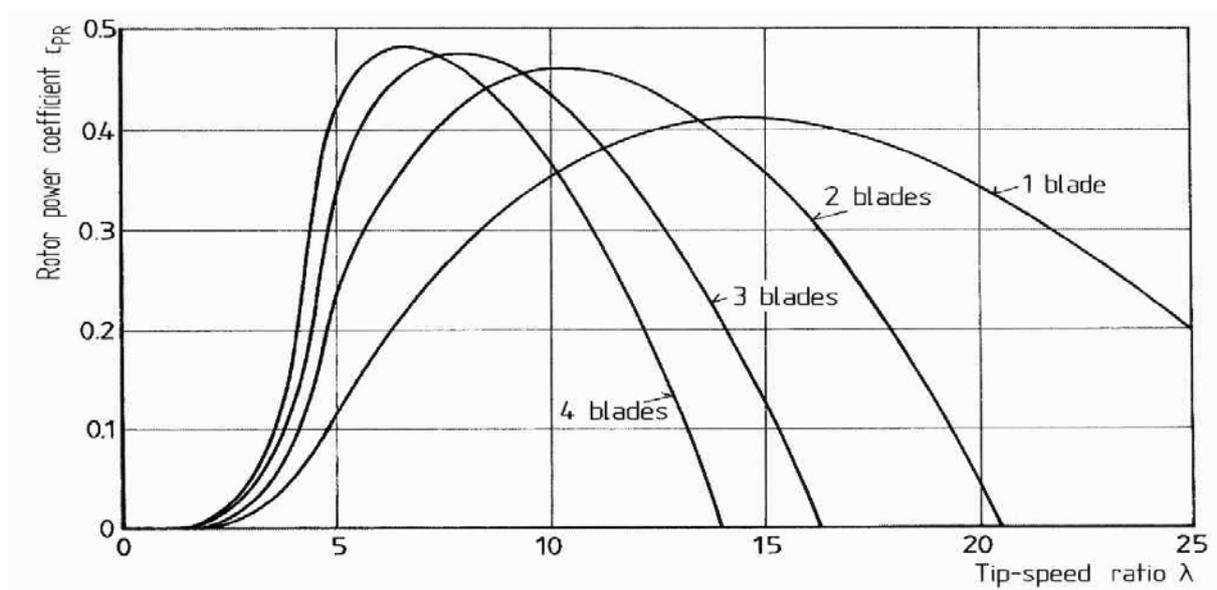
$$\lambda = \frac{R_t * \Omega_t}{V_v} \quad (\text{I.2})$$

$\Omega_t$  : est la vitesse angulaire de rotation de la turbine (rad/s).



**Figure I.14 :** Vitesse de vent ( $V_p$ ) et vitesse tangentielle de l'aubage  $R_t * \Omega_t$ .

La figure (I.15) montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  pour des turbines réelles à axe horizontal avec 1, 2, 3 et 4 pales [15]. On remarque que chaque type d'éoliennes correspond à une vitesse normalisée  $\lambda_{opt}$ , qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique  $C_p(\lambda)$  sera en cloche, plus il sera bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale.

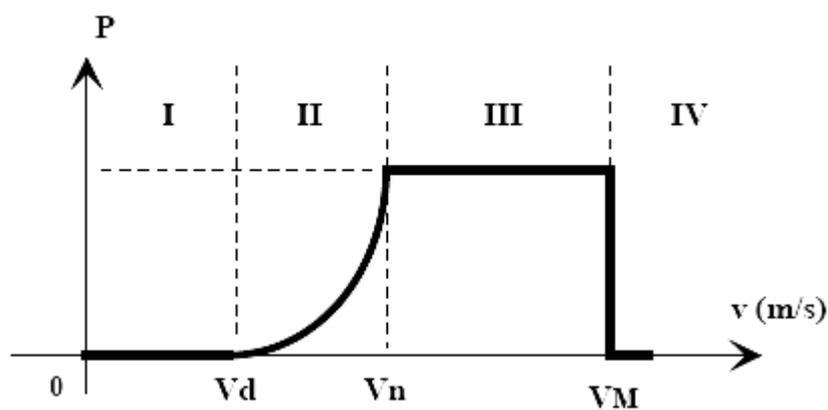


**Figure I.15 :** Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée [15].

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

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale ( $P_n$ ) à partir d'une vitesse du vent nominale ( $V_n$ ). Pour des vitesses de vent supérieures à ( $V_n$ ), la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques 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 dimensionnantes : ( $V_d$ ) est la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et ( $V_m$ ) est la vitesse maximale du vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sureté de fonctionnement [16].



**Figure I.16** : Courbe typique de puissance en fonction de la vitesse du vent [16].

En fonction de la vitesse du vent, quatre zones peuvent être identifiées dans le fonctionnement d'une turbine éolienne tel que montré sur la figure (I.16) :

**Zone I** : Pour des vitesses plus petites que la vitesse de démarrage ( $V_d$ ), l'énergie du vent n'est pas suffisante pour entraîner la turbine et la puissance captée est nulle ;

**Zone II** : Pour des vitesses supérieures à la vitesse de démarrage ( $V_d$ ) est inférieure à celle nominale ( $V_n$ ), la puissance extraite augmente proportionnellement avec la vitesse du vent cubée. Cette zone correspond au régime de « charge partielle » ;

**Zone III** : Pour des vitesses supérieures à la vitesse nominale ( $V_n$ ), la puissance captée est limitée à celle nominale ( $P_n$ ). Cette zone correspond au régime de « charge complète » ;

**Zone IV** : Pour des vitesses supérieures à la vitesse extrême d'opération ( $V_m$ ), la turbine éolienne s'arrête, la puissance fournie s'annule.

### I.3.6. Machines électriques dans les aérogénérateurs

Il existe plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur. On peut citer :

#### ❖ Génératrices asynchrones à cage (GAS)

La plupart des applications destinées à un fonctionnement en moteur utilisent la machine asynchrone, grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteur ou de contacts glissants sur des bagues.

La machine asynchrone fonctionnant en génératrice est obtenue lorsqu'elle tourne à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme.

Pour les aérogénérateurs ayant une grande puissance et un rayon de pales important, la vitesse de rotation est peu élevée, il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice. La puissance nécessaire à sa magnétisation est fournie par le réseau lorsqu'elle est couplée en parallèle ou par une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée.

#### ❖ Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA)

Dans ce cas, le stator de la génératrice est directement couplé au réseau alors l'enroulement rotorique est connecté à ce même réseau via une interface d'électronique de puissance.

Le convertisseur de puissance connecté au rotor (coté rotor) partage un bus de tension continue avec un second convertisseur identique connecté au réseau électrique (coté réseau) via un transformateur. C'est le convertisseur coté rotor qui permet d'imposer les courants nécessaires afin de contrôler les puissances actives et réactives. La tension du rotor étant généralement différente de celle du stator, un transformateur est nécessaire afin d'adapter les différents niveaux de tension.

#### ❖ Génératrices synchrones (GS)

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés de production d'électricité par éolien. Les machines synchrones ne sont pas soumises à la condition d'une vitesse de seuil pour fonctionner en génératrice.

Lorsque la machine est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau, en conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations des couples captés par l'aérogénérateur

atteignent la puissance électrique produite, donc il n'est pas possible de les connecter directement au réseau que par l'intermédiaire de convertisseurs statiques.

Certaines machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotations et peuvent alors être directement couplées à l'aérogénérateur, elles permettent ainsi de s'en passer du multiplicateur.

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents. Les systèmes de conversion basés sur des MSAP à grand nombre de pôles, sont caractérisés par l'absence du multiplicateur de vitesse, ce mode de transmission de puissance (transmission directe) offre un couple massique suffisant pour garantir l'entraînement de la machine. L'inconvénient unique de ces machines est la matière rare de l'aimant et son coût élevé.

### I.3.7. Avantages et inconvénients des générateurs éoliens

#### ❖ Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO<sub>2</sub>.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- Le mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires [17].

#### ❖ Inconvénients

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- Le bruit diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des multiplicateurs [17].

## I.4. Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont les appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative.

### I.4.1. Convertisseur DC/DC (hacheur)

Les convertisseurs continus ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée [5].

### I.4.2. Convertisseur DC/AC (onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite [5].

Nous distinguons plusieurs types d'onduleurs suivant la qualité du signal de sortie :

- Onduleur à onde sinusoïdale modifiée, en marche d'escalier, générateur d'une onde proche de l'onde sinusoïdale.
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion MLI (pulse-width modulation).
- Onduleur à onde sinusoïdale.

### I.4.3. Convertisseur AC/DC (Redresseur)

Le redresseur commandé est le montage le plus simple des montages d'électronique de puissance et permet de transformer l'énergie alternative provenant en général du réseau électrique en une énergie unidirectionnelle quasi-continue que l'on peut diriger vers les moteurs à courant continu [5].

## I.5. Les batteries

Un accumulateur électrochimique ou batterie est un système permettant de convertir de l'énergie électrique en une énergie potentielle chimique durant la phase de charge et de convertir l'énergie potentielle chimique en une énergie électrique lors de la décharge, sans émission de polluants, sans nuisance sonore et avec des conditions de maintenance réduites. Elles sont caractérisées par leurs durées de vie en nombre de cycle de charge /décharge et leurs densités d'énergie et de puissance.

On distingue deux types de batteries : les batteries au nickel, les batteries acides plomb.

## I.6. Généralités sur Les systèmes électriques hybrides SEH

Un système hybride à sources d'énergies renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage [18].

Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable pour satisfaire la demande de la charge.

La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique [19].

Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures, celles-ci sont résumées dans la figure (I.17). Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides contiennent deux bus : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries, un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution.

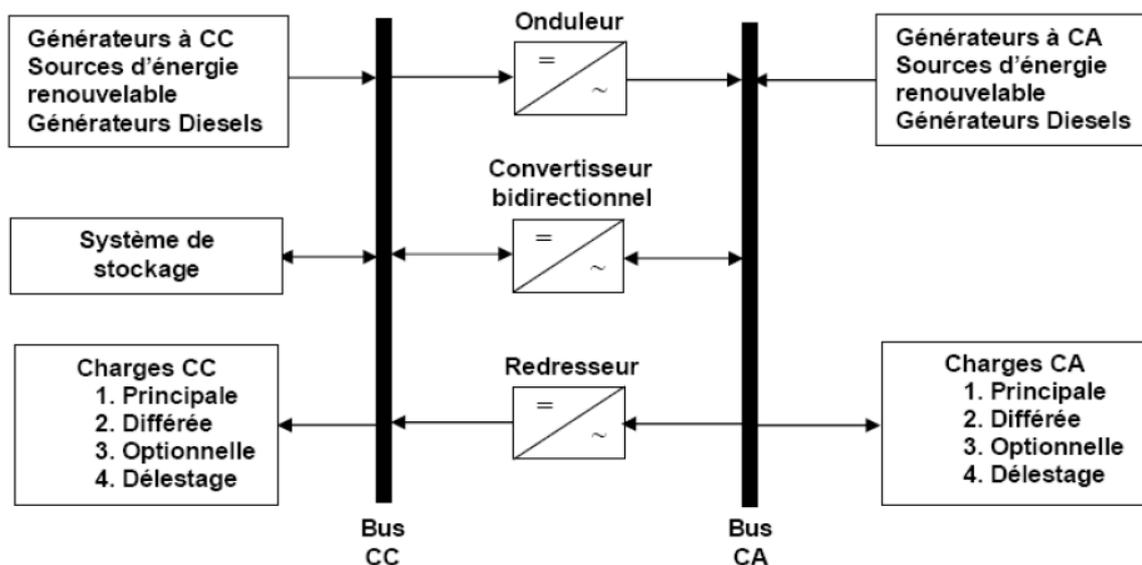


Figure I.17 : Architecture des systèmes hybrides d'énergie [19].

### I.6.1. Configuration du bus dans les systèmes hybrides

Les générateurs électriques d'un Système Hybride peuvent être connectés de différentes manières, qu'ils soient à énergie renouvelable pure, non renouvelable pure ou mixte. Deux configurations s'imposent parmi les systèmes d'énergie hybride constitués de sources d'énergie renouvelable, avec ou sans stockage [20].

### I.6.1.1. Architecture à bus continu CC

Dans le système hybride présenté dans la figure (I.18), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu [21].

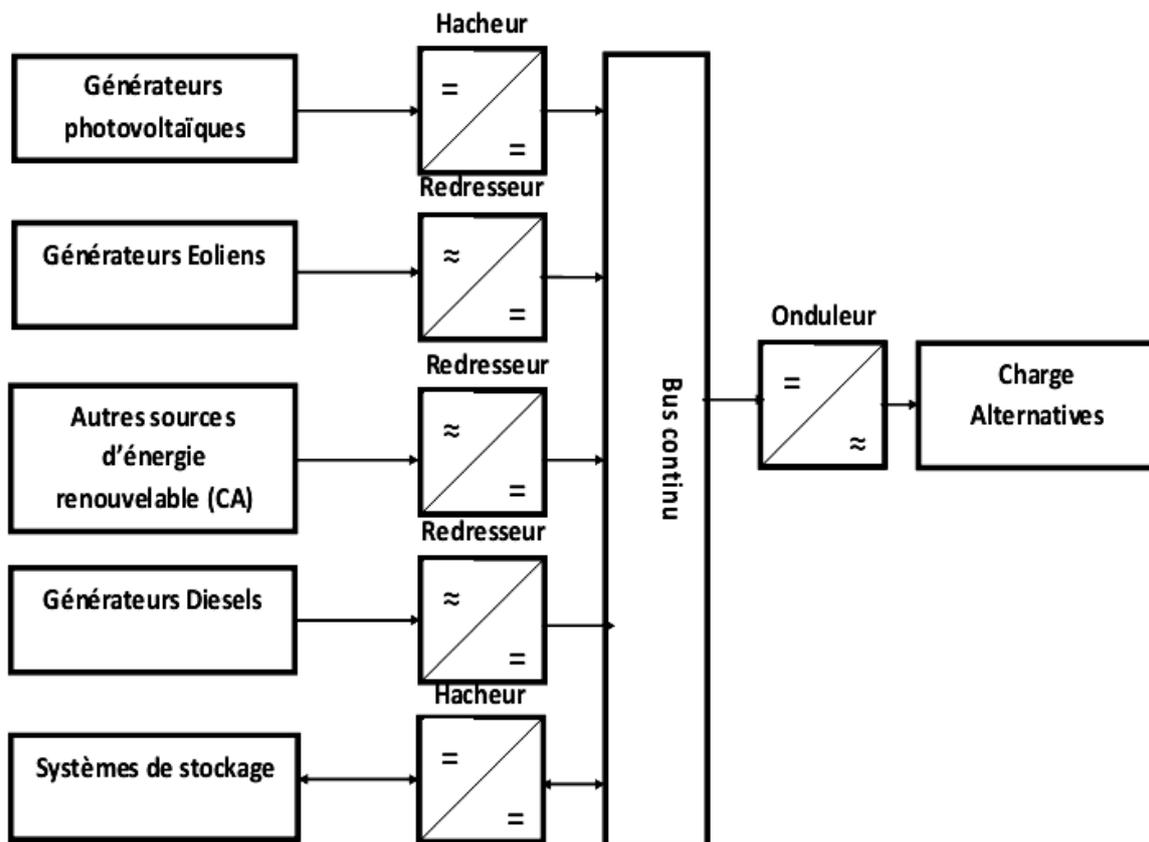


Figure I.18 : configuration du système hybride à bus continu [21].

### I.6.1.2. Architecture à bus alternatif AC

Dans cette topologie, tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative, comme montré sur la figure (I.19). Cette configuration présente des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure, puisque chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs. Ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge. La réalisation de ce système est

relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle, en synchronisant les tensions de sortie avec les tensions de charge [19].

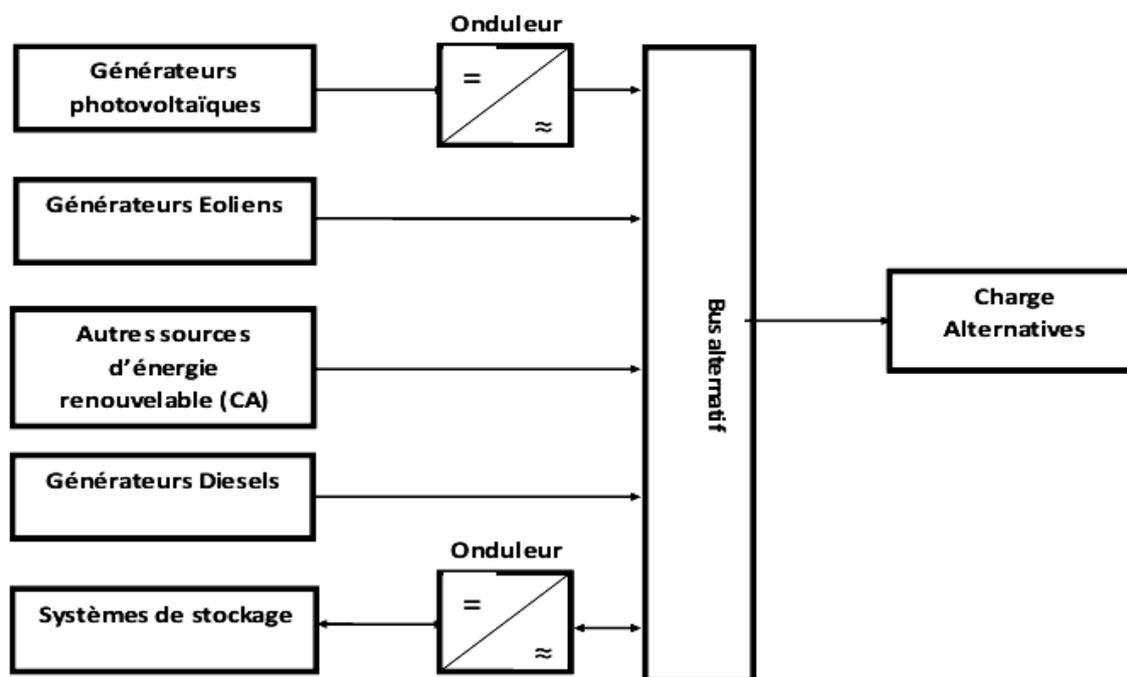


Figure I.19: configuration du système hybride à bus alternatif [19].

## I.6.2. Avantages et inconvénients d'un système hybride

### ❖ Avantages

- Flexible, extensible et Capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduite.
- Non dépendant d'une seule source d'énergie [22].

### ❖ Inconvénients

- Coût de capital élevé comparé aux générateurs diesel.
- Plus complexe que les systèmes électriques isolés, nécessite le stockage de batterie et le conditionnement de l'électricité.
- Pas encore entièrement en production commerciale peu de fournisseurs [22].

## I.7. Groupe moteur-pompe

### I.7.1. Moteur

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou

un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant, mais l'évolution des convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et surtout, moins cher.

### ❖ Moteur à courant continu

Parmi les moteurs à courant continu, seuls les moteurs à aimants permanents et les moteurs série sont utilisés pour des applications de pompage solaire. Eux seuls arrivent à avoir un couple de démarrage suffisant pour vaincre la résistance de démarrage d'une pompe et bien répondre à un courant variable.

### ❖ Moteur à courant alternatif

Le moteur à courant alternatif est utilisé de plus en plus pour les systèmes de pompage photovoltaïque. Le coût peu élevé du moteur, son faible besoin de maintenance et l'efficacité accrue des onduleurs solaires le rendent particulièrement attrayant pour les systèmes de pompage plus importants où le coût additionnel de l'onduleur est moins significatif.

Les moteurs alternatifs asynchrones sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles [23]. Par exemple, les pompes sur réseau utilisent depuis longtemps ce type de moteur. De dimension compacte, il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. Depuis quelques années, l'arrivée d'onduleurs efficaces permettant un contrôle de la vitesse de ces moteurs a permis leur utilisation pour des applications de pompage solaire.

## I.7.2. Pompe

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications qu'on décrira plus loin, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9.8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celles-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau.

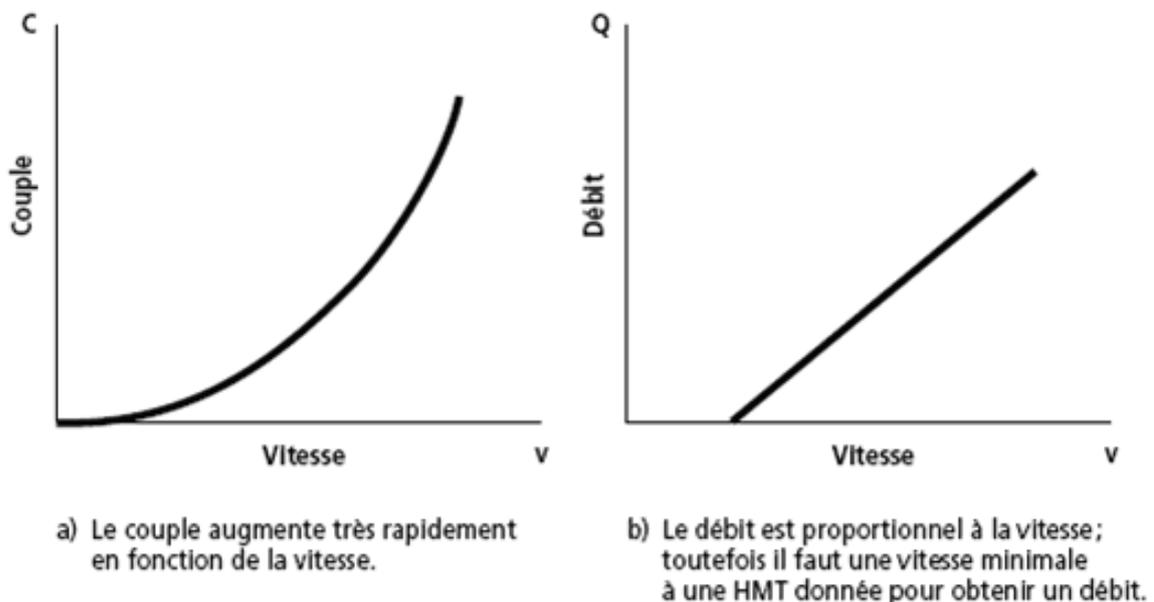
Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface ; la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur.

### ❖ Pompes centrifuges

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse.

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont particulièrement intéressantes dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage : la pompe tourne même par très faible ensoleillement. Mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau (Figure I.20).
- La puissance absorbée est bien adaptée aux modules solaires, fournissant un bon rendement global [05].



**Figure I.20:** Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge.

### ❖ Pompes volumétriques

Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.).

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) et aux grandes hauteurs.
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont auto-amorçages.

Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (est de 3 à 5 fois le couple nominal) comme illustré sur la figure (I.21) et la caractéristique  $I = f(V)$  de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable.

Pour faire face au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour fournir un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système [05].

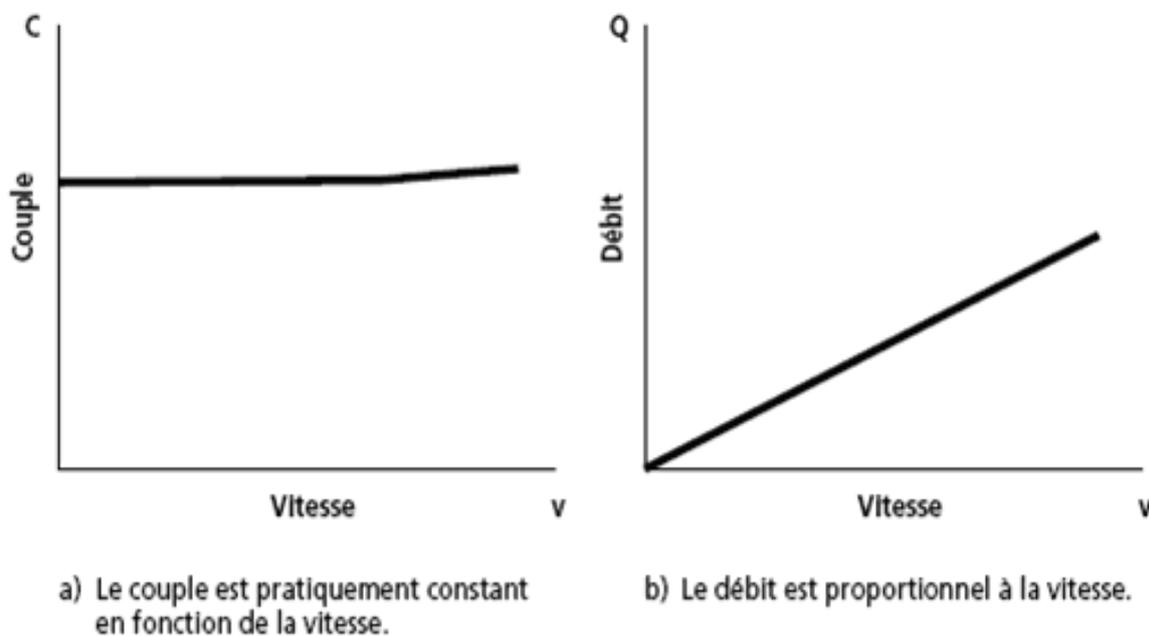


Figure I.21: Courbes du couple et du débit d'une pompe volumétrique.

### I.8. Système hybride étudié

Le système hybride illustré dans la figure (I.22), comprend un sous-système photovoltaïque de 6 panneaux photovoltaïques branchés en parallèle avec un contrôleur de charge qui permet de contrôler à chaque fois l'état de charge des batteries de stockage. Un système éolien

associé à un système de délestage. Le système éolien est constitué d'une turbine éolienne tripale qui assure la conversion de l'énergie du vent en électricité et d'une génératrice synchrone à aimants permanents associé à un redresseur PD3 à diodes. Les deux sources d'énergie sont reliées à un bus continu. Le stockage est assuré par des batteries, ces dernières maintiennent la tension au bus continu 24V. La charge à alimenter peut être continue ou alternative branchée à travers un onduleur monophasé de 220V qui alimente un groupe moteur pompe.

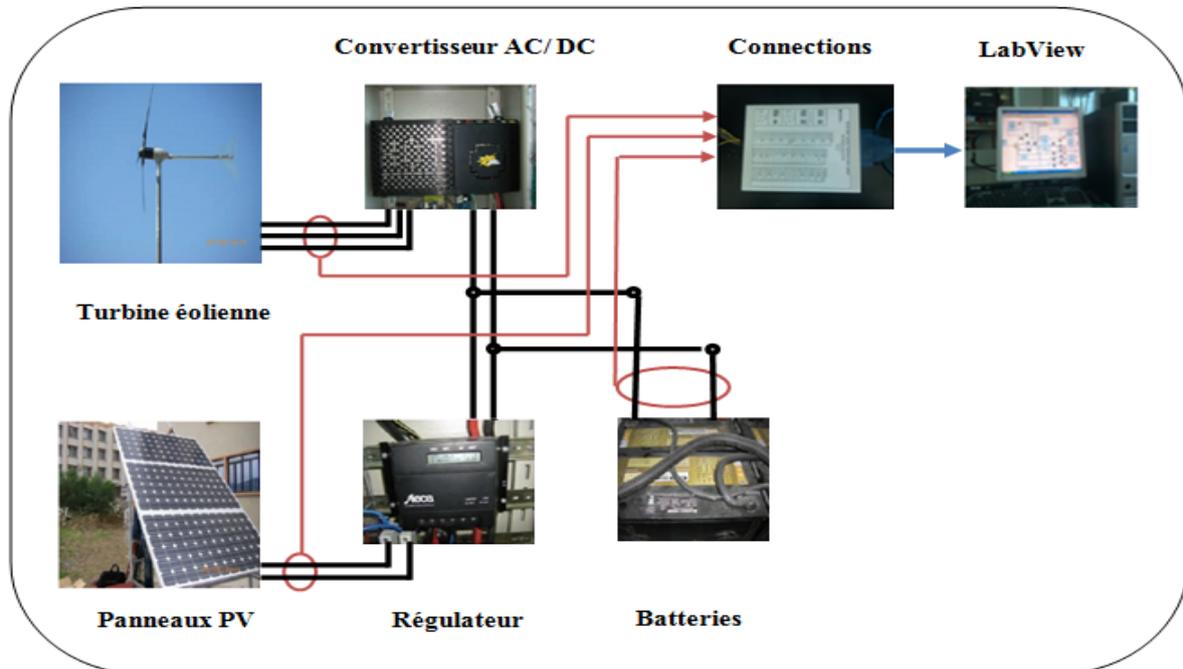


Figure I.22 : Système hybride étudié.

## I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description de l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne associées à un système de stockage qui débite sur un groupe moteur pompe. Ensuite nous avons combiné ces deux énergies pour obtenir un système hybride.

# *Chapitre II*

*Modélisation des composants du  
système hybride (éolien-photovoltaïque)*

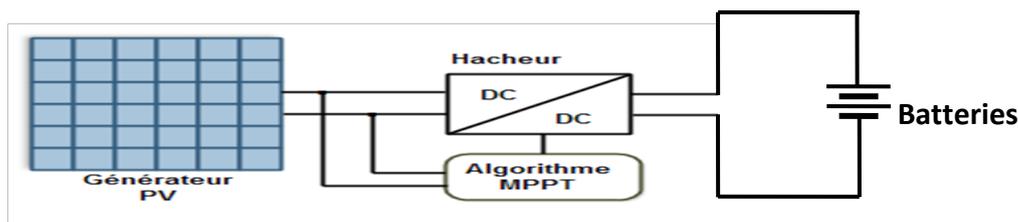
## II.1. Introduction

La modélisation est un moyen destiné à représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique.

Dans ce cadre, nous présenterons, la modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien, en proposant l'élaboration des modèles mathématiques pour les deux systèmes de production, afin de renforcer la maîtrise de leur exploitation, surtout du point de vue puissances de production, en fonction des conditions météorologiques données ou estimées.

## II.2. Structure de la chaîne de conversion photovoltaïque

Notre chaîne de conversion photovoltaïque est composée de six panneaux photovoltaïques branchés en parallèle, qui jouent le rôle d'un générateur PV, et un convertisseur DC/DC à pilotage MPPT (hacheur Boost), ce système alimente une charge (Batteries). La structure de notre chaîne de conversion photovoltaïque est représentée sur la figure (II.1) suivante.



**Figure II.1** : Différents constituants de la chaîne de conversion photovoltaïque.

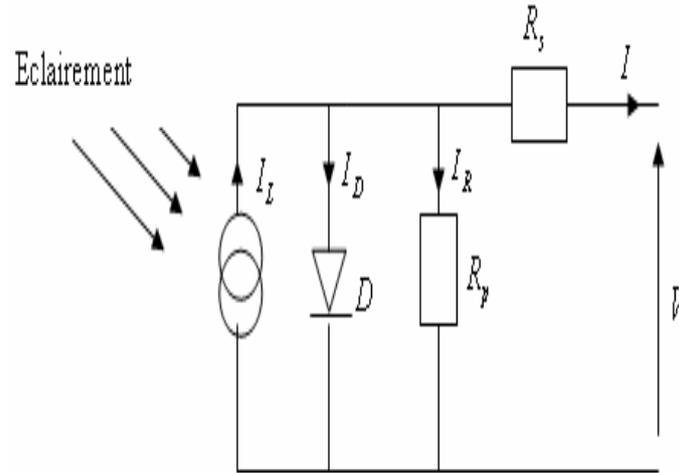
## II.3. Modélisation du générateur photovoltaïque

Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque.

Parmi ces modèles, on trouve [24] :

- ❖ Le modèle idéalisé : c'est le modèle le plus simplifié, la valeur de la résistance  $R_p$  étant généralement très grande, elle est donc souvent supposée infinie (et donc négligée), la valeur de la résistance  $R_s$  étant petite elle est donc supposée nulle.
- ❖ Le modèle à une diode : pour tenir compte des chutes de tensions dans les zones P et N, on doit ajouter une résistance série  $R_s$  dans le modèle idéalisé, et pour le courant de fuite, une résistance parallèle  $R_p$ .
- ❖ Le modèle à deux diodes : une diode supplémentaire mise en parallèle avec la diode du modèle précédent, permettant de reproduire des effets chimiques de recombinaison des électrons.

Le modèle choisit est le modèle à une diode qui tient compte de la variation du courant et de la tension de la cellule photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.



**Figure II.2:** Schéma équivalent d'une cellule solaire.

A partir de la figure (II.2) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

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

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

$$I_L = P_1 E_s (1 + P_2 (E_s - E_{sréf}) + P_3 (T_j - T_{jréf})) \quad (\text{II.2})$$

La température de jonction est donnée par :

$$T_j = T_a + E_s \left( \frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (\text{II.3})$$

Le courant dans la diode est donnée par :

$$I_D = I_0 \left[ \exp \left( \frac{q}{K A n_s T_j} (V + R_s I) \right) - 1 \right] \quad (\text{II.4})$$

Le courant de saturation dans la diode est donné par :

$$I_0 = P_4 T_j^3 \exp \left( \frac{E_g}{K T_j} \right) \quad (\text{II.5})$$

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

$$I_R = \frac{V}{R_p} \quad (\text{II.6})$$

On obtiendra alors :

$$I = P_1 E_s (1 + P_2 (E_s - E_{sréf}) + P_3 (T_j - T_{jréf}) - P_4 T_j^3 \exp\left(\frac{E_g}{KT_j}\right) * \left[ \exp\left(\frac{q}{K A n_s T_j} (V + R_s I)\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_p} \quad (\text{II.7})$$

Où :

$I$  : Le courant de cellule.

$V$  : La tension de cellule.

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

$E_s$  : L'ensoleillement [ $W/m^2$ ].

$E_{sréf}$  : L'ensoleillement de référence [ $W/m^2$ ].

$T_j$  : La température de jonction de la cellule [ $^{\circ}C$ ].

$T_{jréf}$  : La température de jonction de référence [ $^{\circ}C$ ].

$T_a$  : La température ambiante [ $^{\circ}C$ ].

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

$I_0$  : Le courant de saturation [A]

$K$  : La constante de Boltzmann ( $1.3854 * 10^{-23} JK^{-1}$ ).

$n_s$  : Le facteur de qualité de la diode.

$A$  : Coefficient d'idéalité de la cellule.

$E_g$  : Energie de gap.

### ❖ Caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque

Dans notre travail nous avons utilisé le panneau de type SHARP de  $175W_c$ , le tableau (II.1) illustre ses paramètres :

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau $P_m$	175W
Courant au point de puissance maximale $I_{pm}$	4.95A
Tension au point de puissance maximale $V_{pm}$	35.4V
Courant de court-circuit $I_{sc}$	5.4 A
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	44.4 V
Coefficient d'incrémentatation de la tension $V_{oc}$ ( $B_{oc}$ )	-156 mV/ $^{\circ}C$
Coefficient d'incrémentatation du courant $I_{sc}$ ( $\alpha_{sc}$ )	0.053 mA/ $^{\circ}C$

**Tableau II.1:** Paramètres d'un panneau solaire SHARP.

## II.4. Optimisation de la puissance des modules PV

Par définition, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quelque soit les conditions météorologiques (irradiation, température), cette commande place ainsi le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{opt}, I_{opt}$ ). Le premier système de puissance MPPT à été introduit en 1968 pour un système spatial. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum, [25], [26]. A savoir plusieurs méthodes d'optimisation :

- Méthode de contrôleur MPPT basée sur le mode glissant.
- Méthode de contrôleur MPPT basée sur la logique floue.
- Méthode de perturbation et d'observation (P&O).
- Méthode de conductance incrémentielle.

### II.4.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) avec une constante (C) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé [25], [27], comme montré sur les figures (II.3) et (II.4):

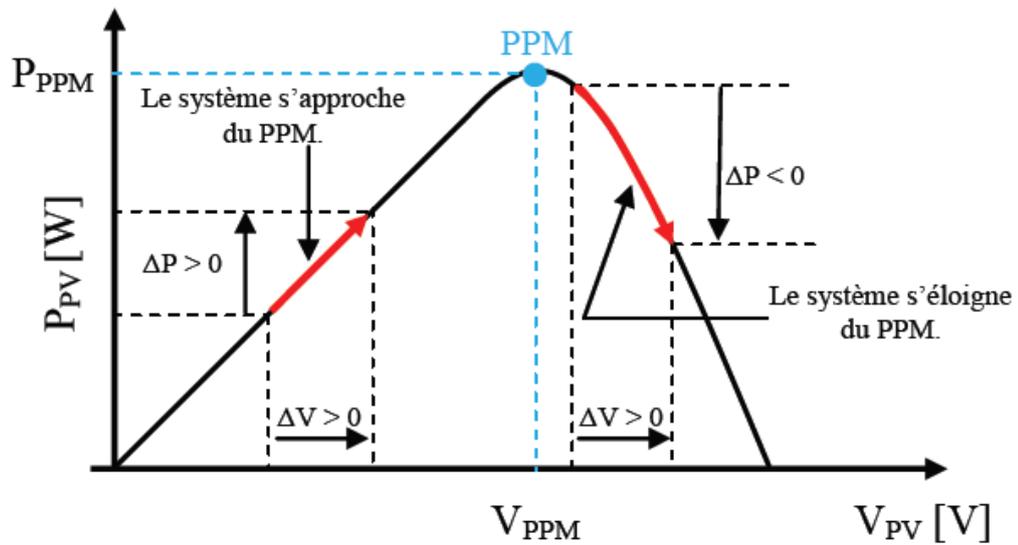


Figure II.3 : Caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  d'un panneau solaire.

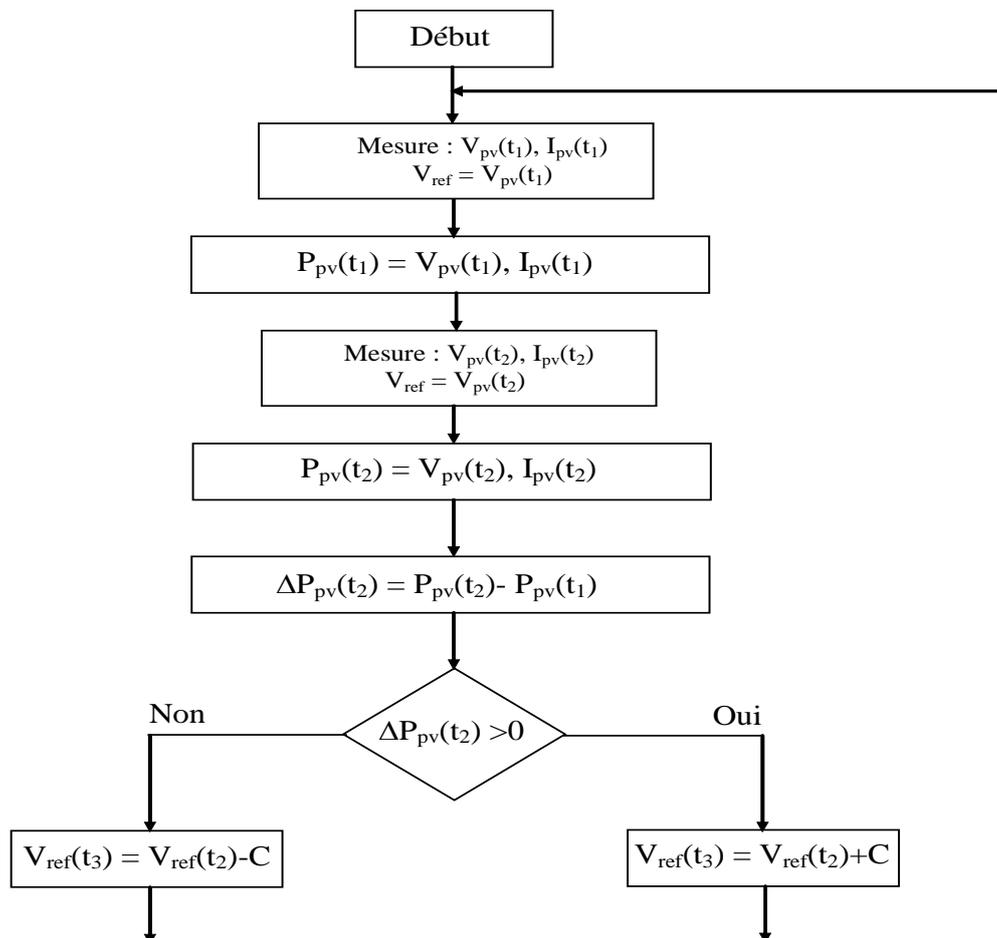


Figure II.4 : Organigramme de la méthode perturbation et observation (PO).

Le point fort de cette méthode est que la connaissance des caractéristiques du générateur photovoltaïque n'est pas exigée aussi c'est une méthode relativement simple.

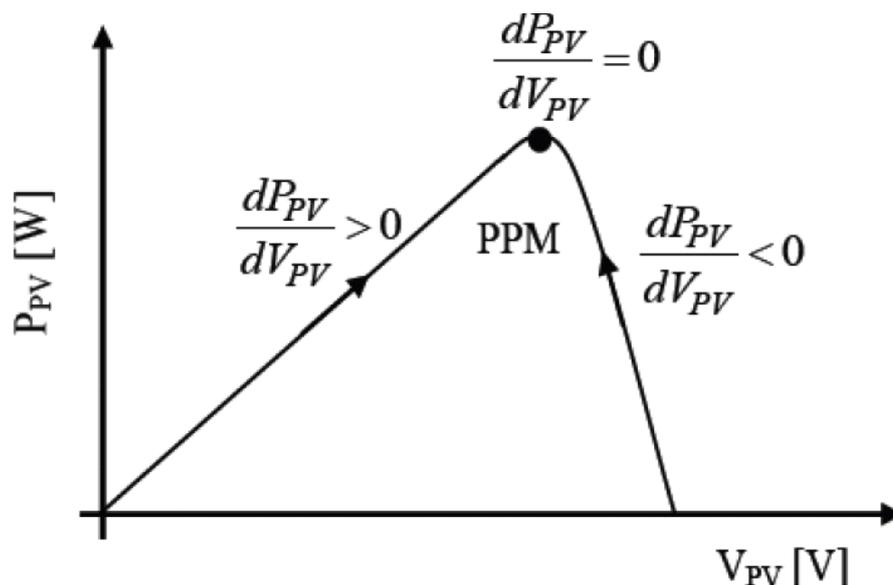
Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour du MPP, provoquant ainsi une perte d'énergie.

#### II.4.2. Méthode de conductance incrémentale

Le courant de sortie du panneau photovoltaïque et sa tension sont utilisés pour calculer la conductance et la conductance incrémentielle. Son principe consiste à comparer entre la conductance ( $G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ ) et de sa dérivée ( $\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$ ) et de décider quand augmenter ou diminuer la tension photovoltaïque afin d'atteindre le MPP où la dérivée de la puissance ( $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ ), comme la montre la figure (II.5).

La méthode conductance incrémentielle est souvent jugée efficace de point de vue efficacité de recherche du point de puissance maximale [25], [28].

Cependant l'algorithme à implémenter est souvent complexe et nécessite une capacité de calcul grande, ce qui réduit la période de contrôle du système.



**Figure II.5 :** Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe  $\frac{dP}{dV}$  sur la caractéristique de la puissance.

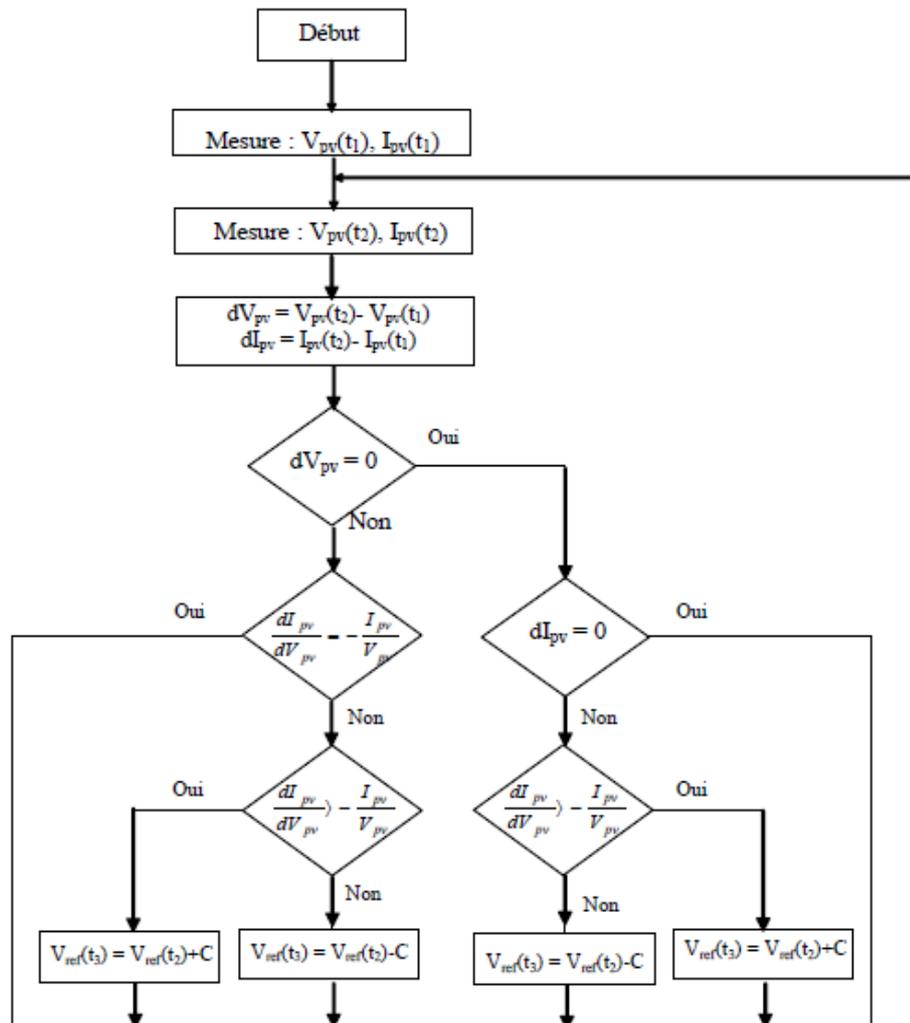


Figure II.6 : Organigramme de la méthode conductance incrémentielle.

## II.5. Modèle d'un hacheur survolteur (Boost)

Augmenter la tension d'une source, revient à utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur dont le schéma de fonctionnement est représenté à la figure (II.7). Ce convertisseur continu-continu de l'électronique de puissance permet d'adapter la tension aux bornes du panneau PV pour atteindre le point de fonctionnement maximal.

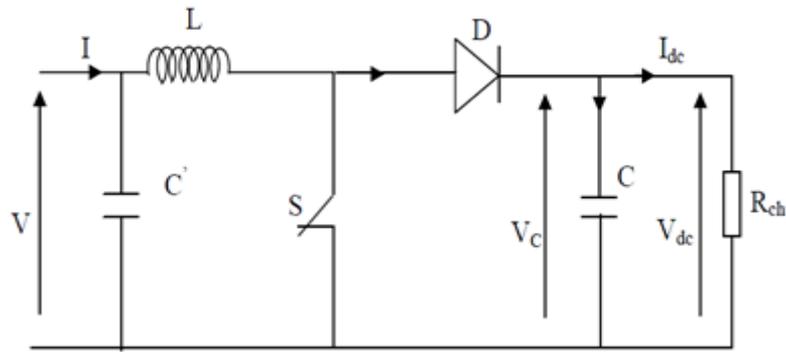


Figure II.7: Circuit électrique du convertisseur DC-DC.

Les figures (II.8), (II.9) montrent le cycle de fonctionnement, de période de hachage T, qui comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant et la diode polarisée en inverse, donc bloquée. Cette phase dure de 0 à  $\alpha.T$  ( $\alpha$  rapport cyclique, est compris entre 0 et 1).

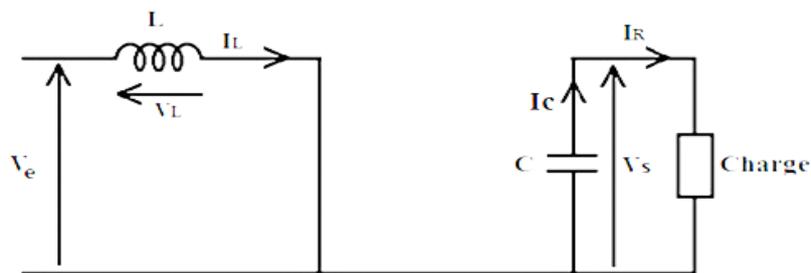


Figure II.8: Schéma d'un Hacheur survolteur à  $t \in [0, \alpha.T]$ .

Le condensateur C supposé initialement chargé, fournit de l'énergie à la charge et un courant  $I_R$  circule dans cette dernière.

$$\begin{cases} V_L = -V_e = L \frac{dI_L}{dt} \\ V_S = R \cdot I_R \end{cases} \quad (II.8)$$

Lors de la seconde période, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de  $\alpha.T$  à T.

Avec :  $I_C = I_R$

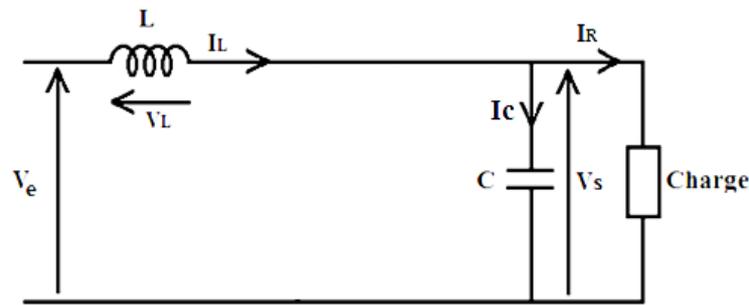


Figure II-9 : Schéma d'un Hacheur survolteur à  $t \in [\alpha. T, T]$ .

$$\begin{cases} V_L = V_e - V_s \\ I_c = I_L - I_R \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

On en déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_s = \frac{1}{1-\alpha} \cdot V_e \\ I_R = (1-\alpha) \cdot I_L \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

## II.6. Modélisation de la batterie

Il existe différents types de modèles de batteries dans la littérature. Le modèle de la batterie choisi dans cette présente étude utilise une source idéale de tension mise en série avec une résistance et une capacité comme la montre la figure (II.10) :

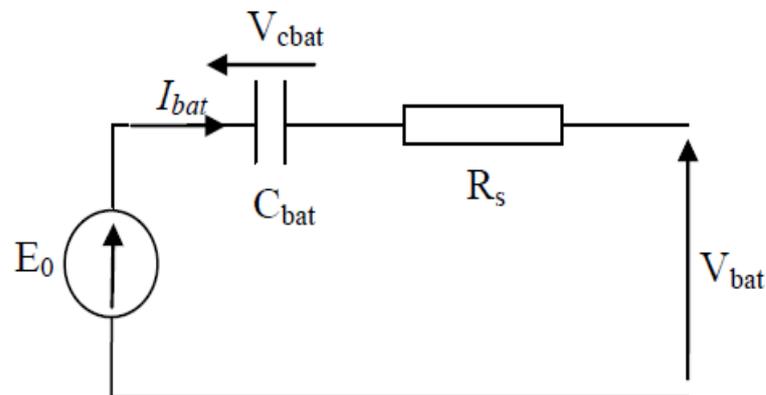


Figure II.10 : Modèle R-C de la batterie.

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{cbat} \quad (\text{II.11})$$

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

$$EDC = 1 - \frac{Q_{bat}}{C_{bat}} \quad (\text{II.12})$$

Tel que :

$$Q_{bat} = I_{bat} t_{bat} \quad (II.13)$$

$$C_{bat} = \frac{Q_{bat}}{V_{bat}} \quad (II.14)$$

Avec :

$C_{bat}$  : La capacité (Ah) nominale de la batterie.

$Q_{bat}$  : La quantité de charge (C) manquante par rapport à  $C_{bat}$ .

## II.7. Structure de la chaîne de conversion éolienne

La structure de la chaîne de conversion éolienne est représentée sur la figure (II.11) suivante :

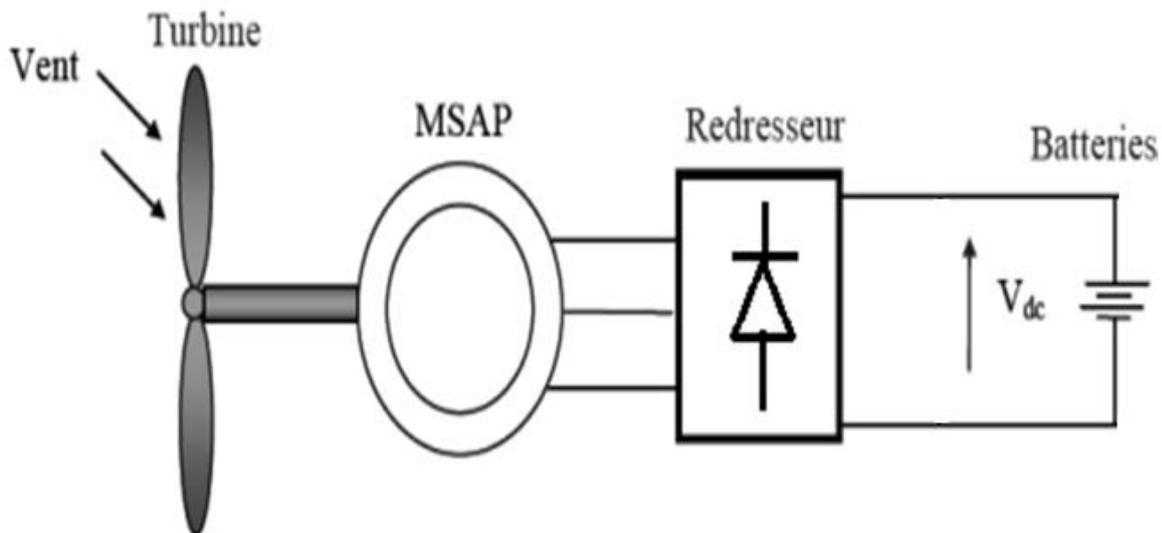


Figure II.11 : Structure de la chaîne de conversion éolienne.

## II.8. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

Notre chaîne de conversion éolienne se compose d'une voilure qui capte l'énergie cinétique du vent couplée directement à une génératrice synchrone qui débite sur un bus continu via un redresseur à diodes et des batteries de stockage. C'est la structure que nous retenons pour ce travail de modélisation et de simulation.

### II.8.1. Modélisation du vent

La vitesse du vent est la grandeur d'entrée d'un système de conversion éolienne. Elle est souvent représentée sous forme d'une fonction scalaire temporelle  $V_V = f(t)$ .

La puissance du vent est définie comme suit :

$$P_V = \frac{1}{2} \rho S V_V^3 \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$\rho$ : Est la densité d'air [ $\text{Kg.m}^{-3}$ ].

$S = \pi R^2$  : Est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pôle [ $\text{m}^2$ ].

$V_V$  : Est la vitesse du vent [ $\text{m/s}$ ].

### II.8.2. Modélisation de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

$C_P$  : Est appelé coefficient de puissance, de l'éolienne, est propre à chaque voileure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent par :

$$C_P = \frac{2P_t}{\rho S V_V^3} \quad (\text{II.16})$$

Selon la caractéristique propre de la voileure  $C_P(\lambda)$  de l'équation (II.16), la puissance de la turbine éolienne est calculée ainsi :

$$P_t = \frac{1}{2} C_P(\lambda) \rho S V_V^3 \quad (\text{II.17})$$

Le couple aérodynamique est donné par la formule suivante :

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = C_P \frac{\rho S V_V^3}{2} \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II.18})$$

### II.8.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse adapte la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice.

$$T_t = \frac{T_{em}}{G} \quad (\text{II.19})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

- G est le gain du multiplicateur.
- $T_{em}$ , le couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone,
- $T_t$ , le couple développé par la turbine sous l'action du vent.
- $\Omega$ , est la vitesse mécanique de la génératrice.

### II.8.4. Modèle de l'arbre de transmission

$$J \frac{d\Omega}{dt} + T_{vis} = T_{em} - T_t \quad (II.21)$$

Le couple visqueux dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottement visqueux  $f$  tel que :

$$T_{vis} = f\Omega \quad (II.22)$$

Avec :

$J$  : L'inertie totale de l'arbre de transmission.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

### II.9. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne en termes de robustesse, maintenance et prix par rapport à la machine asynchrone à double alimentation.

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses simplificatrices [29]:

- . L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- . La distribution sinusoïdale de la  $FMM$  créée par les enroulements du stator.
- . L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- . L'effet d'encoche est négligeable.
- . La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

Avec :

$V_{sa, sb, sc}$  : Les tensions des phases statoriques.

$i_{sa, sb, sc}$  : Les courants statoriques.

$R_s$  : La résistance des phases statoriques.

$\phi_{sa, sb, sc}$  : Les flux totaux à travers les bobines statoriques.

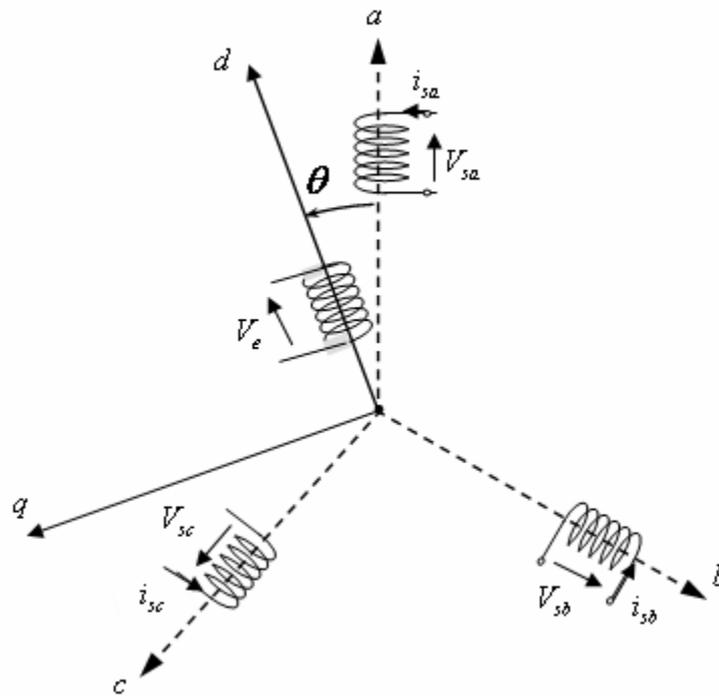


Figure II.12 : Structure de la génératrice synchrone.

Pour simplifier le système d'équations à coefficients variables, un modèle dans le repère de Park de cette machine, sera utilisé  $V_{sd}, V_{sq}$  et  $I_{sd}, I_{sq}$ . Le repère de Park est en fait un repère diphasé, similaire au repère triphasé, plus simple à manipuler comme montré sur la figure (II.12), (II.13). On peut passer d'un repère à un autre à l'aide de la matrice de passage.

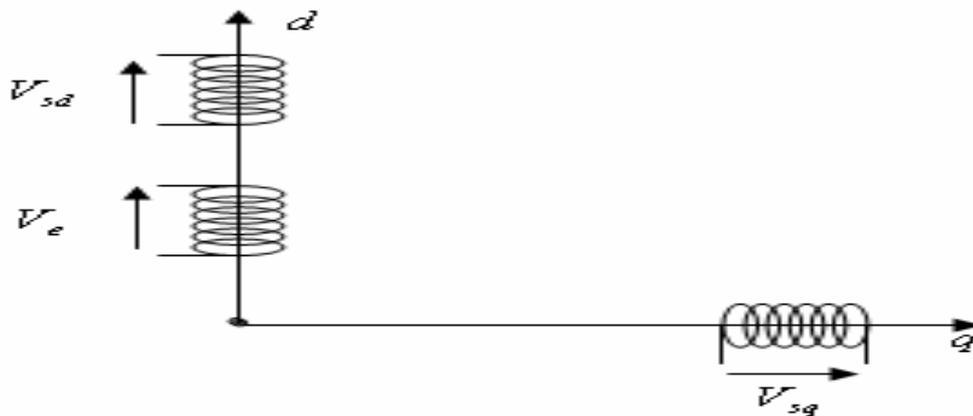


Figure II.13 : Développement des enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe (dq).

$$[V_{sdq}] = [P(\theta)][i_{sabc}] \tag{II.24}$$

Avec :

$P(\theta)$  : Matrice de Park, donnée par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Comme les enroulements statoriques sont montés en étoile à neutre isolé, la somme instantanée des courants statoriques est nulle, de sorte qu'il n'y a pas de courant homopolaire.

$$\text{Tel que : } i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (\text{II.26})$$

Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou de flux, elle n'intervient pas dans le couple.

La matrice de transition de Park devient alors :

$$[P_2(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Et sa matrice inverse est donnée par :

$$[P_2(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

On a :

$$[V_{sdq}] = [P_2(\theta)][V_s] \quad (\text{II.29})$$

$$[i_{sdq}] = [P_2(\theta)]^{-1}[i_s] \quad (\text{II.30})$$

Tel que :

$$[V_{sdq}]^t = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix}, [i_{sdq}]^t = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [V_s]^t = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, [i_s]^t = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Après simplification, on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} - \phi_{sq} W_r \\ \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} + \phi_{sd} W_r \end{array} \right. \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_{sd} I_{sd} + \Phi_f \\ \Phi_{sq} = L_{sq} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

$I_{sd}, I_{sq}$  : Courants statoriques dans le repère de Park [A].

$V_{sd}, V_{sq}$  : Tensions statoriques dans le repère de Park [V].

$L_s$  : Inductance cyclique statorique [H].

$R_s$  : Résistance statorique [ohms].

$\Phi_f$  : Flux inducteur créé par les aimants permanents.

Sachant que pour la machine synchrone, on a  $\omega_r = \omega$ , et en remplaçant l'équation (II.33) dans (II.32), on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} - L_{sq} I_{sq} \omega \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} + L_{sd} I_{sd} \omega + \Phi_f \omega \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

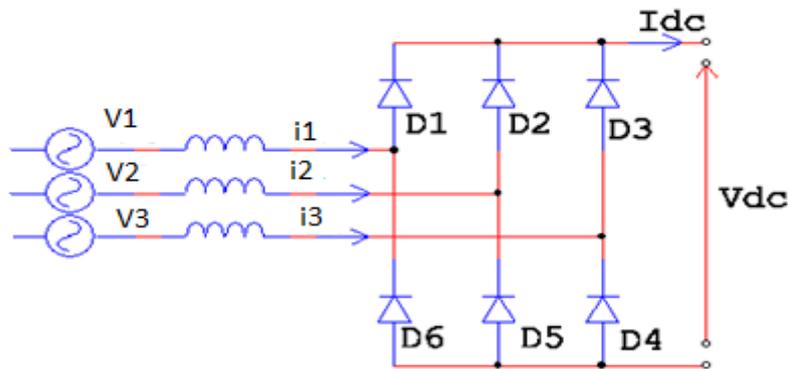
Le couple électromécanique développé par les machines synchrones à f.é.m. sinusoïdale peut être donné par la relation suivante:

$$C_e = P[\Phi_{sd} * I_{sq} - \Phi_{sq} * I_{sd}] \quad (\text{II.35})$$

Après simplification, on aura :

$$C_e = P((L_{sd} - L_{sq})I_d + \Phi_f) * I_{sq} \quad (\text{II.36})$$

## II.10. Modélisation du redresseur PD3 à diodes



**Figure II.14:** Redresseur PD3 à diodes.

D'après la figure (II.14), lorsque la diode D1 conduit, l'une des deux diodes D5 et D4 conduit également ; il en vient que D1 conduit lorsque V1 est supérieure à V2 et V3.

Pendant chaque séquence de conduction, la tension  $V_{dc}$  à la sortie du redresseur est :

$$\begin{cases} V_{dc} = \max(V_j) - \min(V_j) \\ V_{redmoy} = 3 * \sqrt{3} * \frac{V_m}{\pi} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$V_{dc}$  : La tension redressée.

$V_m$  : La valeur maximale de la tension.

## II.11. Bus Continu

Le bus continu de la figure (II.15) est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de la tension.

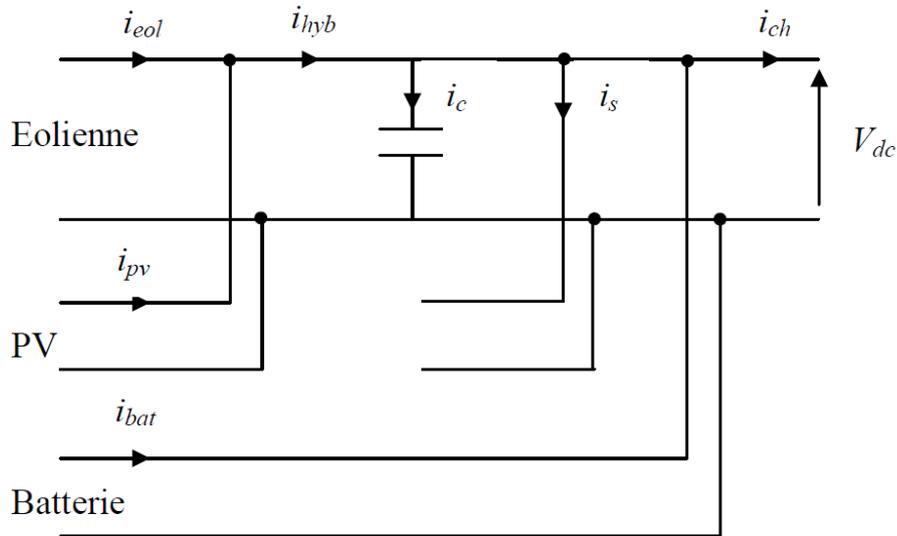


Figure II.15 : Schéma d'un bus continu.

D'après la figure (II.15), on a :

$$i_{hyb} = i_{eol} + i_{pv} \quad (II.38)$$

$$i_{ch} = i_{hyb} - i_c - i_s \pm i_{bat} \quad (II.39)$$

$$\text{Avec : } i_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (II.40)$$

Donc la tension du bus continu est égale :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} * i_c dt \quad (II.41)$$

$i_{pv}$  : Courant fourni par le générateur photovoltaïque [A] ;

$i_{eol}$  : Courant fourni par le système éolien [A] ;

$i_c$  : Courant qui traverse la capacité [A] ;

$i_{hyb}$  : Courant produit par le système hybride éolien-PV [A] ;

$i_s$  : Courant de délestage [A] ;

$i_{bat}$  : Courant de la batterie [A] ;

## II.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un système électrique hybride (éolien-photovoltaïque) avec batterie de stockage. Cette modélisation nous permettra de simuler les performances du système global étudié.

# *Chapitre III*

## *Gestion de puissance du système hybride*

### III.1. Introduction

Le chapitre précédent consacré à la modélisation des composants du système hybride, voir la modélisation de la chaîne de conversion éolienne et photovoltaïque, a permis d'établir les modèles mathématiques des différents éléments constituant le système étudié.

Dans ce chapitre, on présente les résultats obtenus après simulation d'abord des deux sous-systèmes éolien et photovoltaïque, ensuite du système hybride pour gérer la puissance entre ses différents composants dans le but de contrôler les échanges d'énergie entre les composants du système global et aussi pour réguler le processus de charge et de décharge de la batterie.

### III.2. Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque

Le schéma de Matlab/Simulink de la figure (III.1), présente le système photovoltaïque avec stockage.

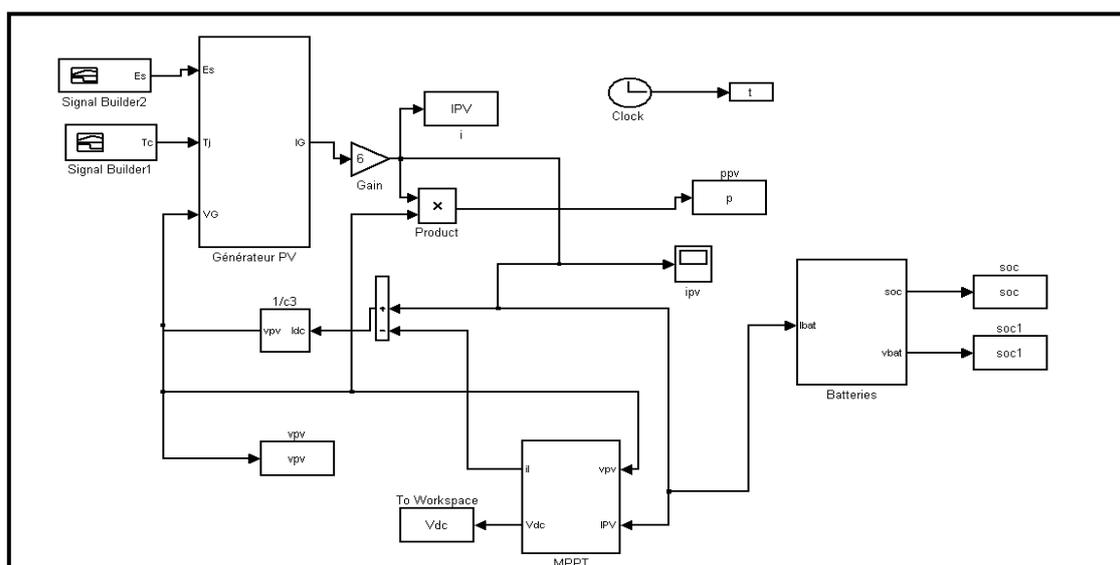
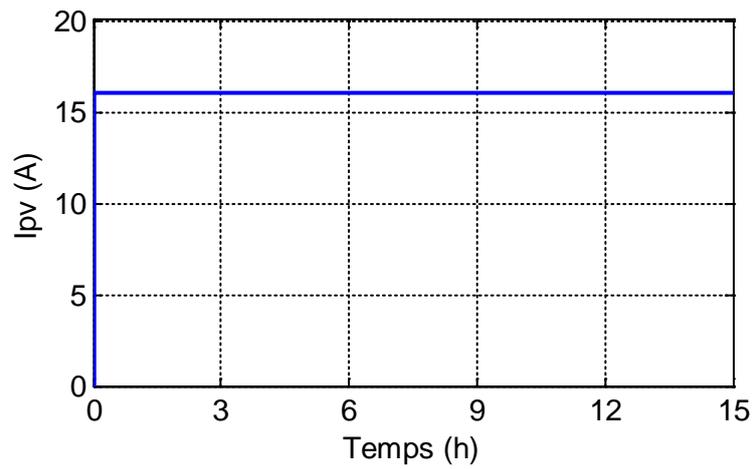


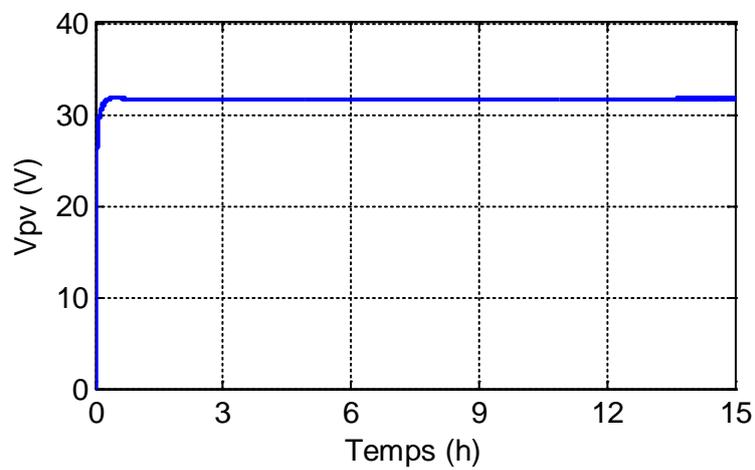
Figure III.1: Schéma Bloc du système photovoltaïque.

#### III.2.1. Résultats de simulation

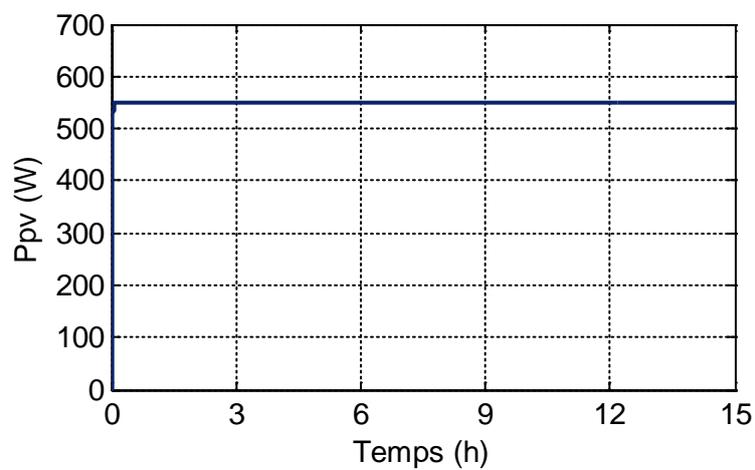
Les résultats de simulation sont obtenus pour un ensoleillement  $E_s = 600W/m^2$  et une température de  $T_c = 25^\circ C$ .



**Figure III.2:** L'allure du courant photovoltaïque.



**Figure III.3:** L'allure de la tension photovoltaïque.



**Figure III.4:** L'allure de la puissance photovoltaïque.

Les figures (III.2), (III.3) et (III.4) illustrent la variation en fonction du temps respectivement du courant, de la tension et de la puissance photovoltaïque. On remarque que le courant photovoltaïque, la tension photovoltaïque et leur produit qui donne la puissance photovoltaïque sont constants au fil du temps.

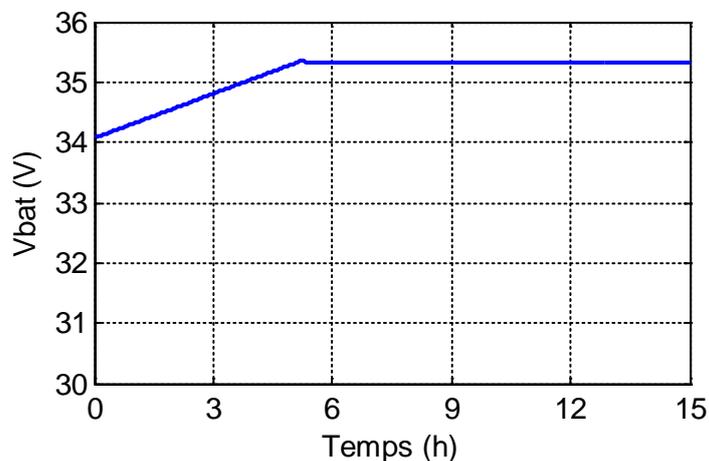


Figure III.5: Tension de batterie.

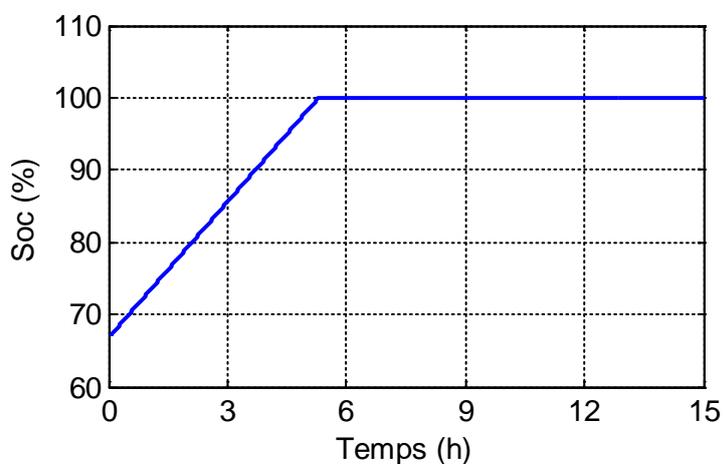


Figure III.6: Etat de charge.

Les figures (III.5) et (III.6) illustrent respectivement la variation temporelle de la tension de la batterie et de son état de charge. Initialement la tension de la batterie est égale à 34 V qui correspond à un état de charge de 68% pour évoluer ensuite et résider à la valeur de 35.5 V qui correspond à un état de charge de 100%.

### III.3. Simulation de la chaîne de conversion éolienne

On fait une simulation du système éolien avec stockage sur Matlab/Simulink est le schéma bloc réalisé est donné par la figure (III.7).

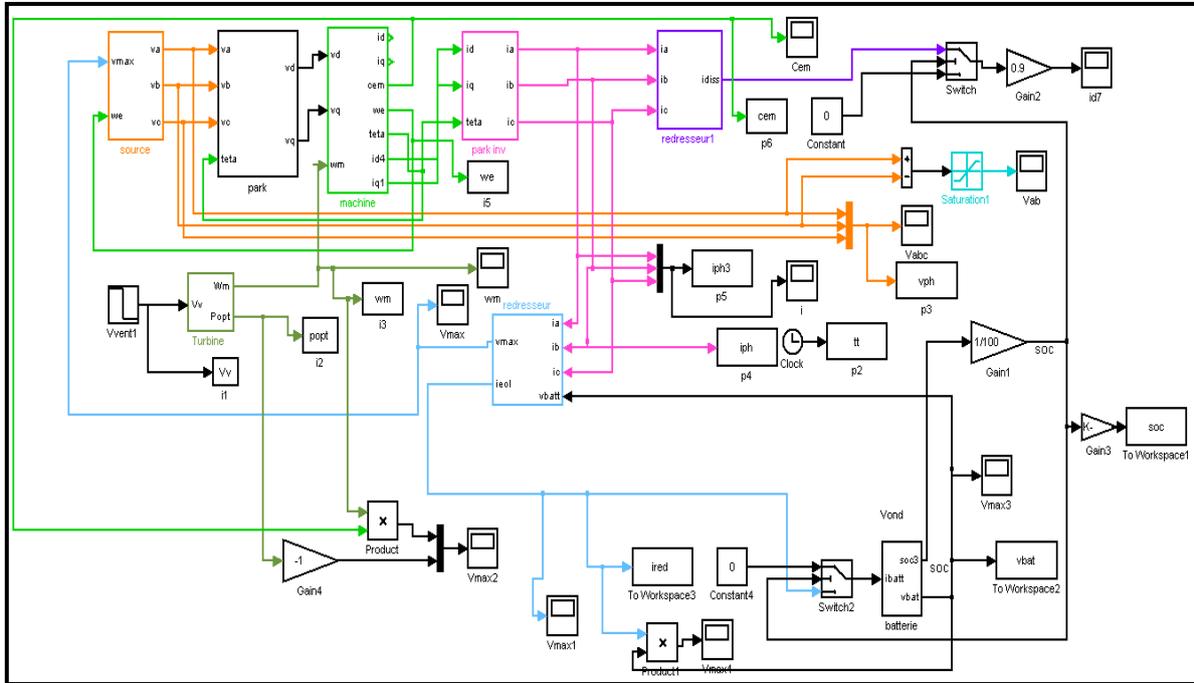


Figure III.7 : Schéma Bloc du système éolien.

#### III.3.1. Résultats de simulation

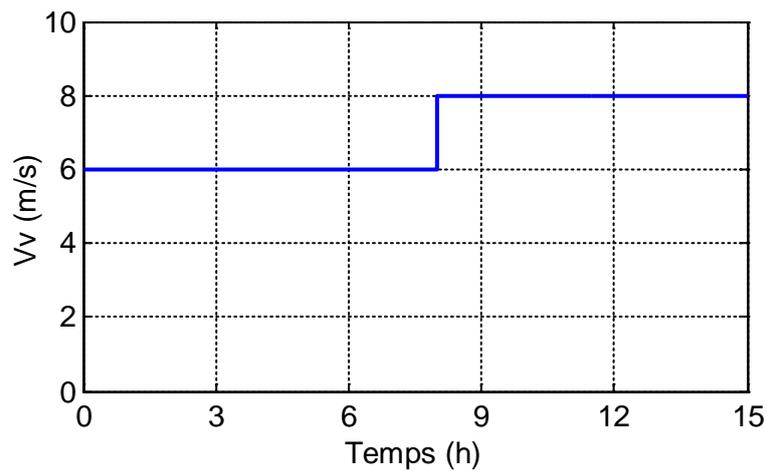


Figure III.8 : Profil du vent admissible par la turbine [m/s].

La figure (III.8) montre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps. La vitesse du vent est initialement égale à  $6 \text{ m/s}$  puis atteint la valeur de  $8 \text{ m/s}$  après une durée  $t = 8 \text{ h}$ .

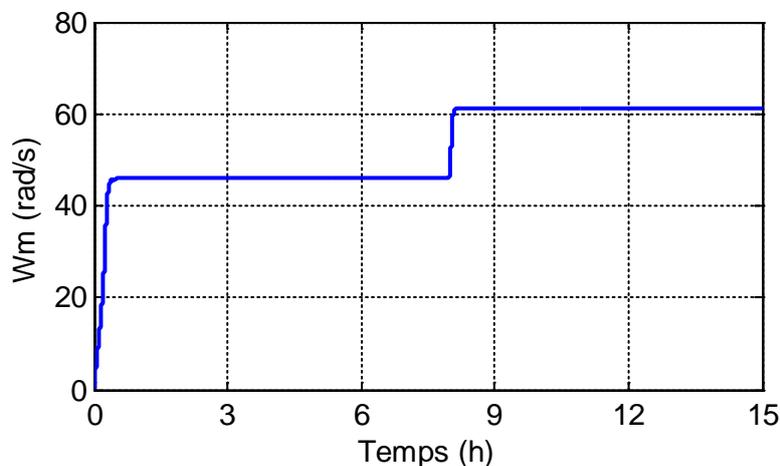


Figure III.9 : Vitesse mécanique de la turbine [rad/s].

La figure (III.9) illustre l'évolution de la vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps. Pour un échelon de vent de vitesse égale à ( $V_v = 6 \text{ m/s}$ ), l'allure de la courbe prend une forme constante et ( $W_m = 45 \text{ rad/s}$ ), et lorsque la vitesse du vent est égale à ( $V_v = 8 \text{ m/s}$ ), la courbe se stabilise à la valeur ( $W_m = 62 \text{ rad/s}$ ).

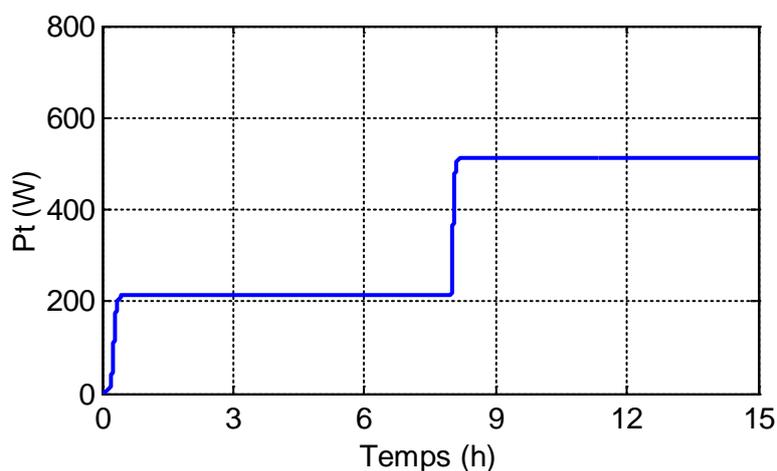
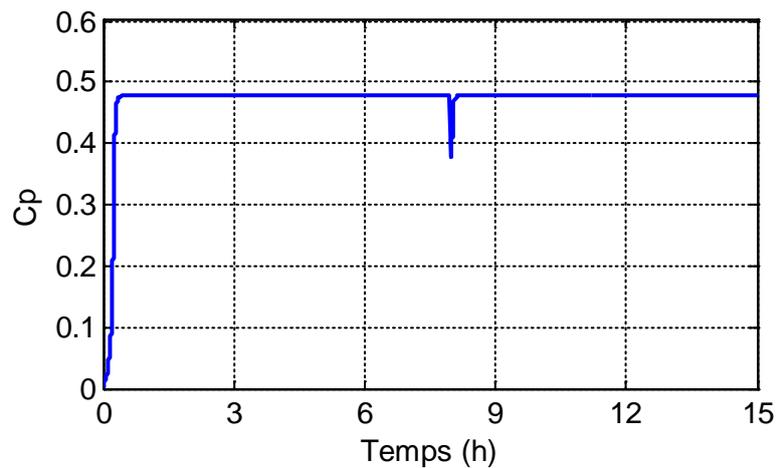


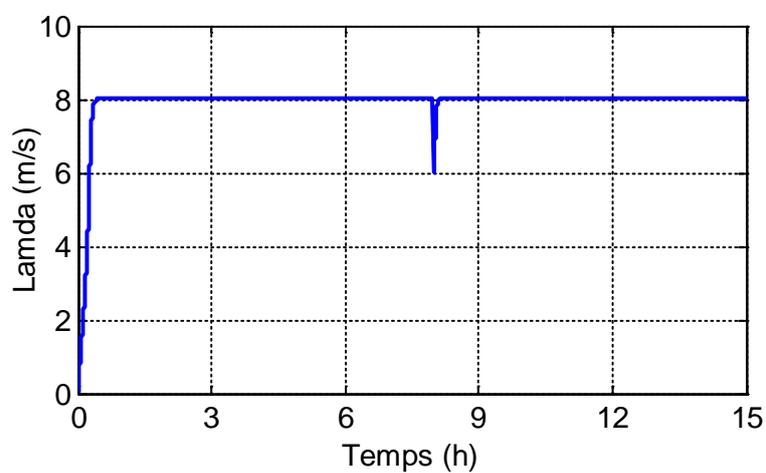
Figure III.10 : Puissance mécanique de la turbine [W].

La figure (III.10) illustre la variation de la puissance mécanique de la turbine en fonction du temps, correspondant à un profil de vent variable. L'allure de la courbe est l'image de celle de la vitesse de rotation de la turbine.



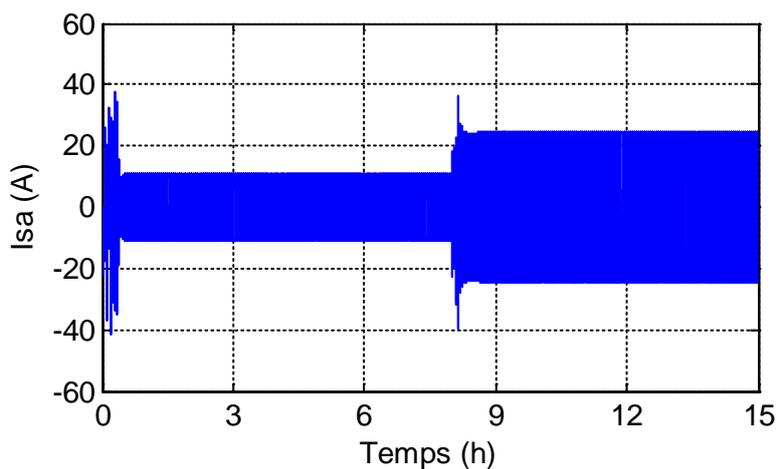
**Figure III.11** : Coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine.

La figure (III.11) illustre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine en fonction du temps. Le  $C_p$  atteint une valeur maximale de ( $C_{pmax} = 0.48$ ), pour s'y stabiliser, et cela quelque soit la valeur appliquée de la vitesse du vent.



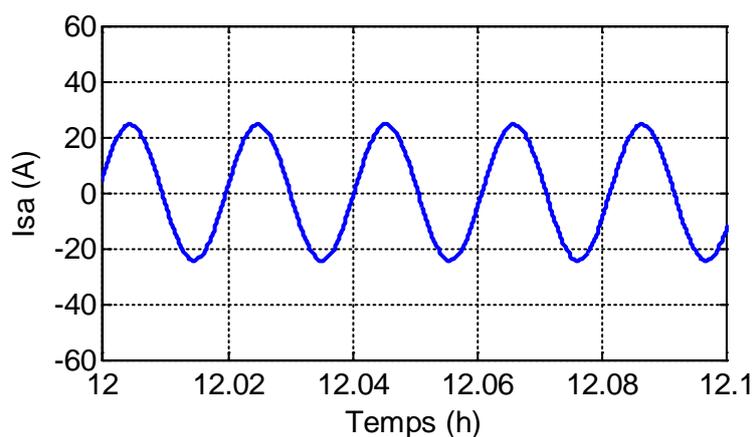
**Figure III.12** : Coefficient  $\lambda$  de la turbine.

La figure (III.12) montre l'évolution du coefficient  $\lambda$  en fonction du temps. Pour une vitesse de vent variable, le  $\lambda$  atteint une valeur optimale de ( $\lambda_{opt} = 8.1$ ) et reste constante. L'allure de la courbe de  $\lambda$  est l'image de celle du  $C_p$ .



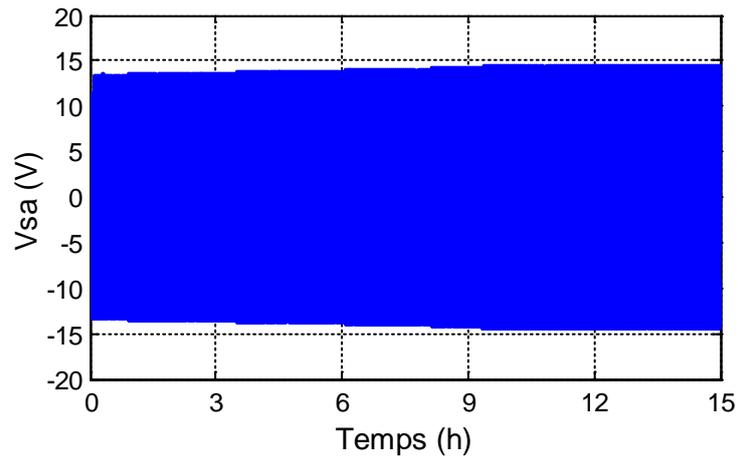
**Figure III.13** : Courant statorique à la sortie de l'éolienne avant le Zoom [A].

La Figure (III.13) illustre l'évolution du courant de sortie de l'éolienne en fonction du temps. On remarque que la variation du courant est importante tout au long du temps de mesure et elle suit la variation de la vitesse du vent.



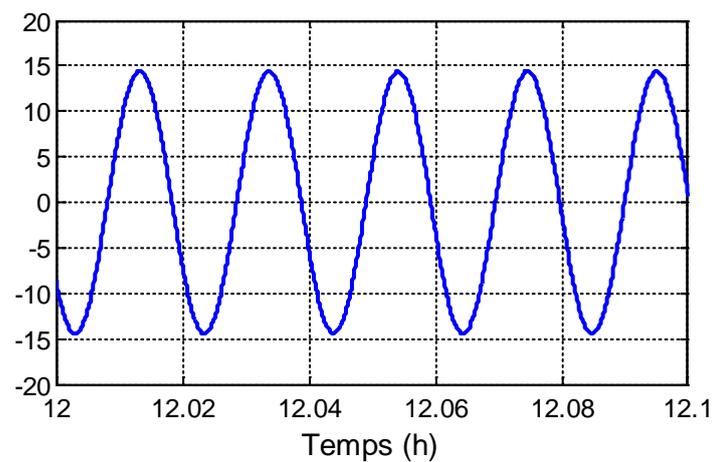
**Figure III.14** : Courant statorique à la sortie de l'éolienne après le Zoom [A].

La figure (III.14) illustre l'aspect sinusoïdal du courant à la sortie de la machine éolienne et elle suit la variation de la vitesse du vent.



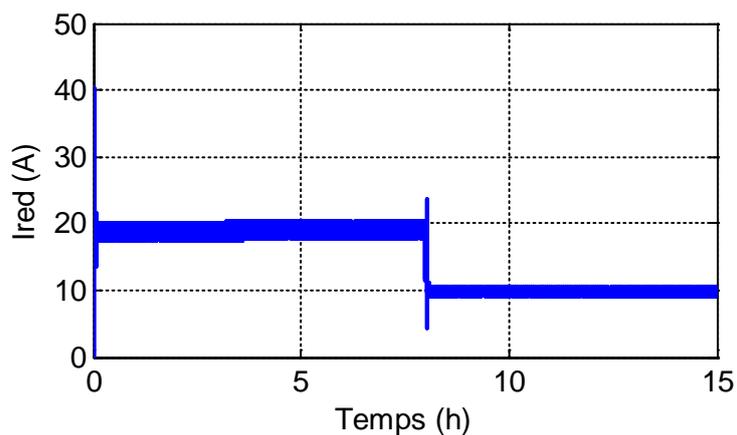
**Figure III.15 :** Tension statorique à la sortie de l'éolienne avant Zoom [V].

La figure (III.15) montre l'évolution de la tension statorique à la sortie de l'éolienne en fonction du temps. On constate que la tension reste constante au fil du temps.



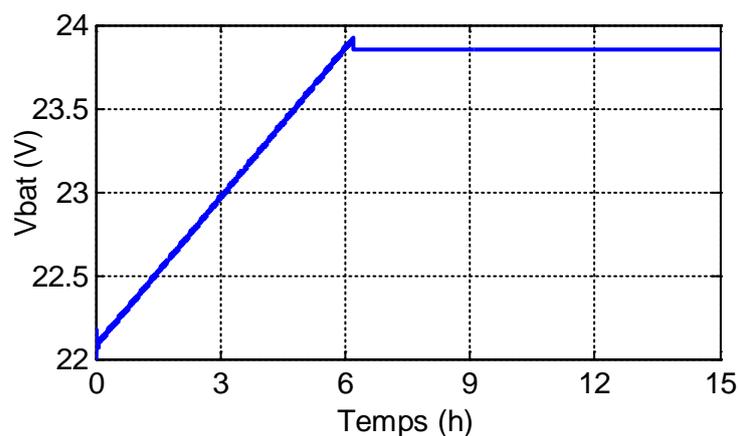
**Figure III.16 :** Tension statorique à la sortie de l'éolienne après Zoom [V].

La figure (III.16) montre l'évolution de la tension statorique à la sortie de la machine éolienne en fonction du temps, où l'on voit clairement l'aspect sinusoïdal de la tension.



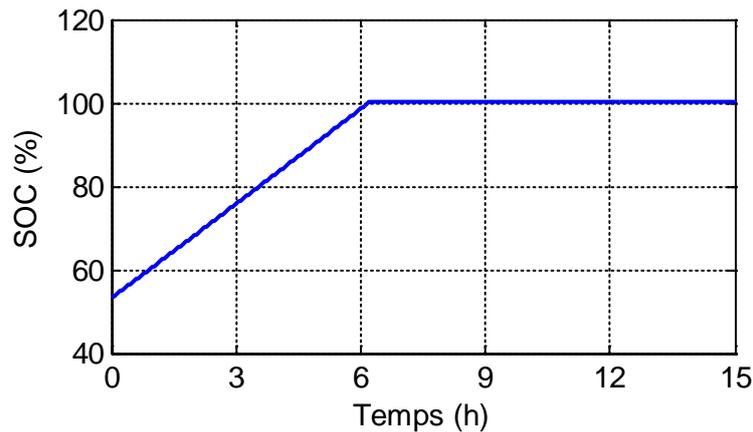
**Figure III.17** : Courant redressé [A].

La figure (III.17) illustre l'évolution du courant redressé à la sortie du redresseur PD3 en fonction du temps. Lors de la première phase la courbe se stabilise à la valeur ( $I_{red} = 20A$ ), ensuite durant la deuxième phase, la valeur du courant diminue pour atteindre ( $I_{red} = 10A$ ).



**Figure III.18** : Tension aux bornes de la batterie [V].

La figure (III.18) illustre l'évolution de la tension des batteries en fonction du temps. Durant la première phase, la tension de la batterie progresse pour atteindre la valeur ( $V_{bat} = 24V$ ) où elle se stabilise lors de la seconde phase.

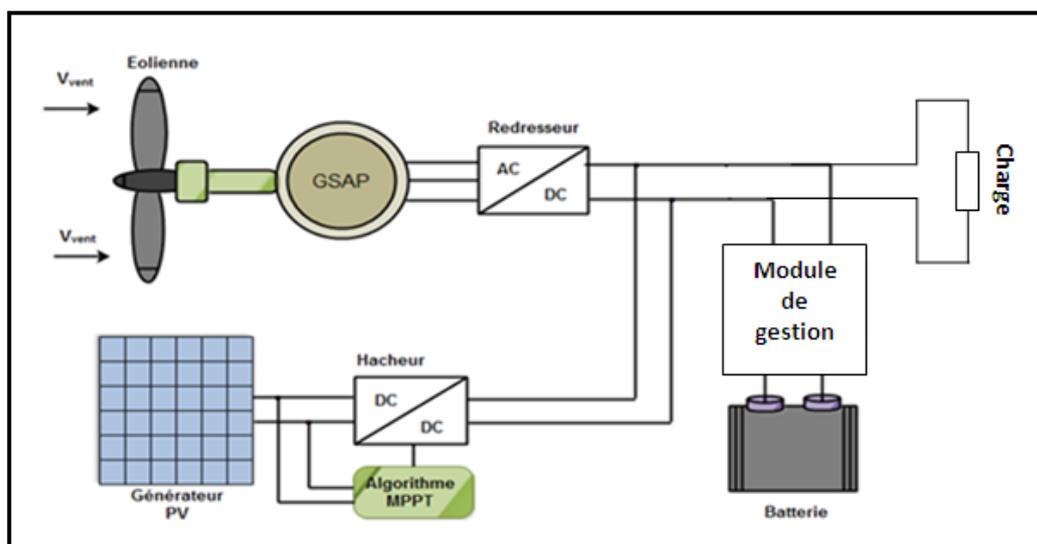


**Figure III.19** : Etat de charge de la batterie [%].

La figure (III.19) illustre l'état de charge de la batterie en fonction du temps. Initialement la batterie est chargée à 55%, pour atteindre ensuite la valeur de 100% de sa charge.

### III.4. Description du système hybride étudié

La figure (III.20) présente le système hybride étudié qui est constitué de deux systèmes d'énergies renouvelables, l'un contient une éolienne de  $1kW$  associée à une génératrice synchrone à aimants permanents débitant sur un redresseur à diodes PD3, l'autre système est constitué de 6 panneaux branchés en parallèle de type SHARP  $175W$  chacun et un convertisseur DC/DC à pilotage MPPT (Hacheur BOOST). Les deux sources d'énergies sont reliées à un contrôleur de charge puis à des batteries de  $24V$ . Le système alimente une charge (groupe motopompe) alternative de  $700W$ .



**Figure III.20**: Système hybride étudié.

Le schéma Matlab/Simulink de la figure (III.21) représente le système global éolien photovoltaïque avec stockage.

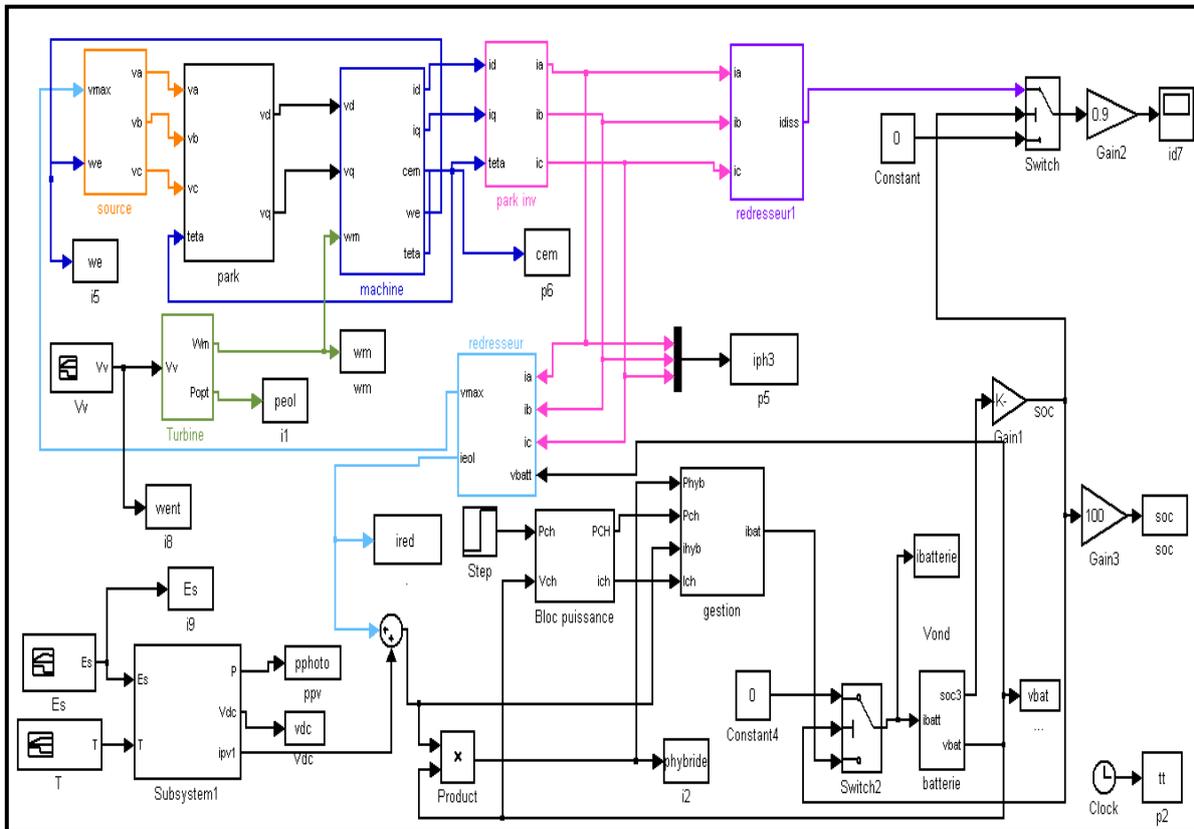


Figure III.21: Schéma Bloc du système hybride.

### III.4.1. Résultat de simulation

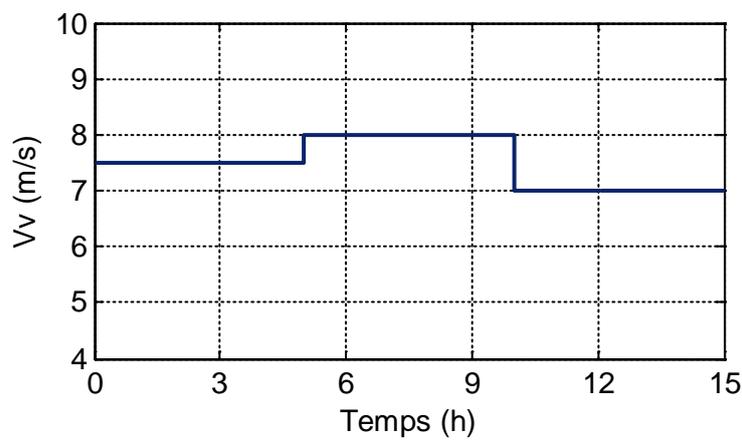
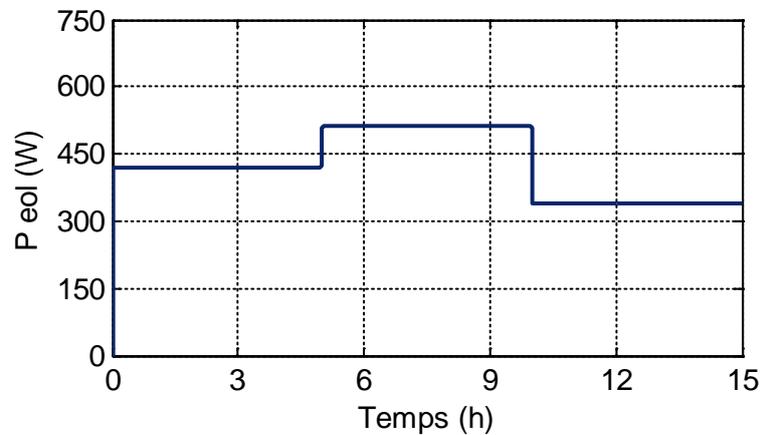


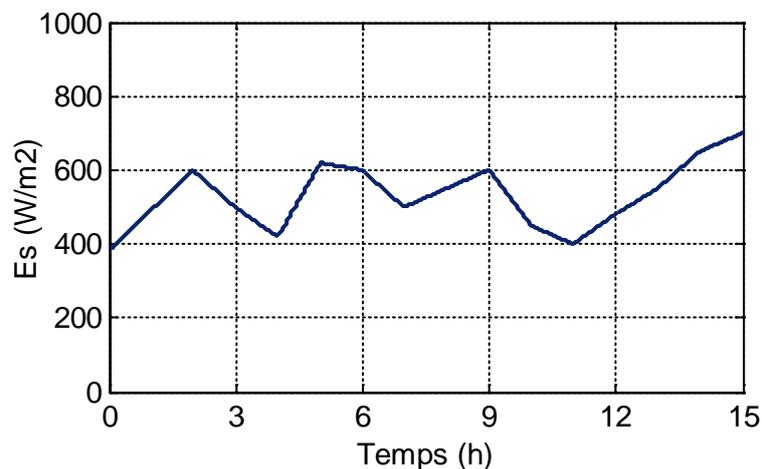
Figure III.22: Profil du vent.

La figure (III.22) illustre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps. Le profil du vent appliqué au système hybride varie entre deux valeurs limites ( $V_v = 7 \text{ m/s}$  et  $V_v = 8 \text{ m/s}$ ) durant un certain temps.



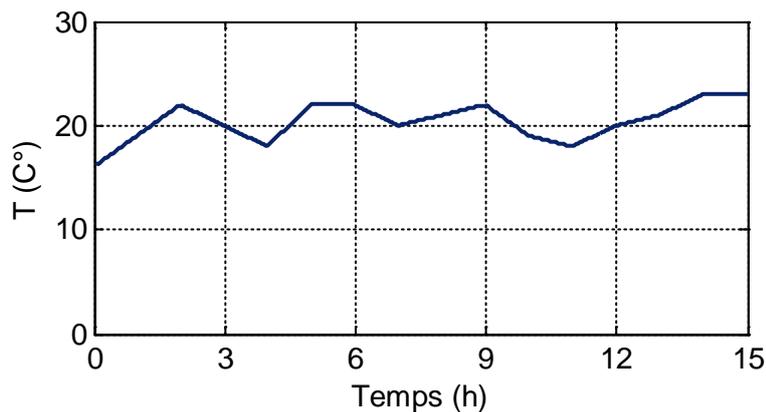
**Figure III.23:** Puissance de la turbine éolienne.

La figure (III.23) illustre l'évolution de la puissance éolienne en fonction du temps. La puissance éolienne varie entre deux valeurs ( $P_{éol} = 350 \text{ w}$  et  $P_{éol} = 500 \text{ w}$ ) durant une durée déterminée. On remarque que la puissance éolienne varie proportionnellement à la vitesse du vent.



**Figure III.24:** Variation temporelle de l'ensoleillement ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

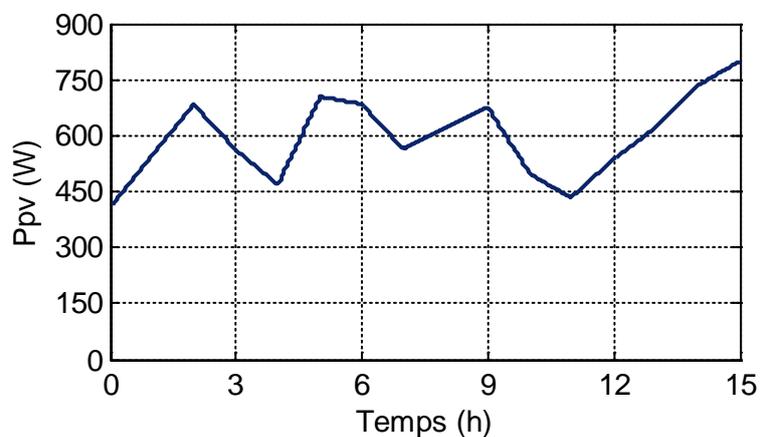
La figure (III.24) représente la variation de l'ensoleillement en fonction du temps. L'ensoleillement réel varie entre deux valeurs ( $E_s = 400 \text{ W}/\text{m}^2$ ) et ( $E_s = 600 \text{ W}/\text{m}^2$ ).



**Figure III.25:** L'allure de la température [°C].

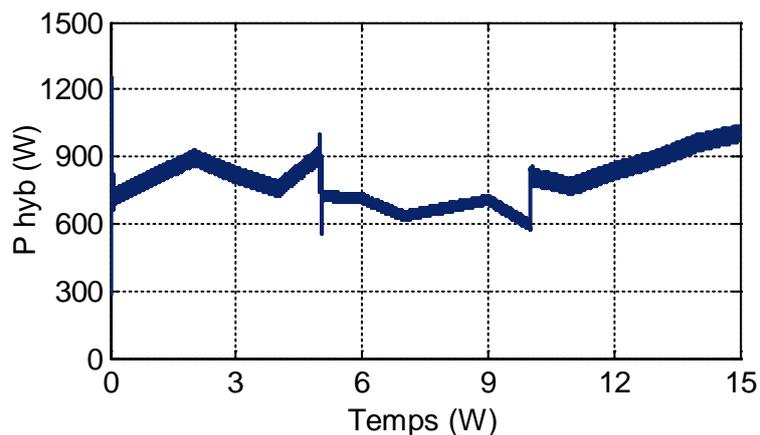
La figure (III.25) représente la variation de la température réelle en fonction du temps.

La température varie entre deux valeurs ( $T = 17\text{ °C}$  et  $T = 22\text{ °C}$ ).



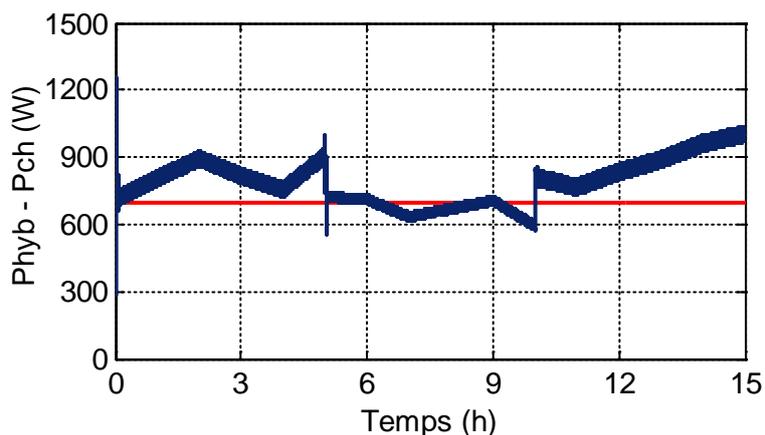
**Figure III.26:** Puissance photovoltaïque du système.

La figure (III.26) montre l'évolution temporelle de la puissance photovoltaïque en fonction du temps. On remarque d'après la figure que la puissance varie entre deux valeurs limites qui sont ( $E_s = 400\text{ w}$  et  $700\text{ w}$ ). L'allure de la puissance photovoltaïque est l'image de la variation de l'ensoleillement.



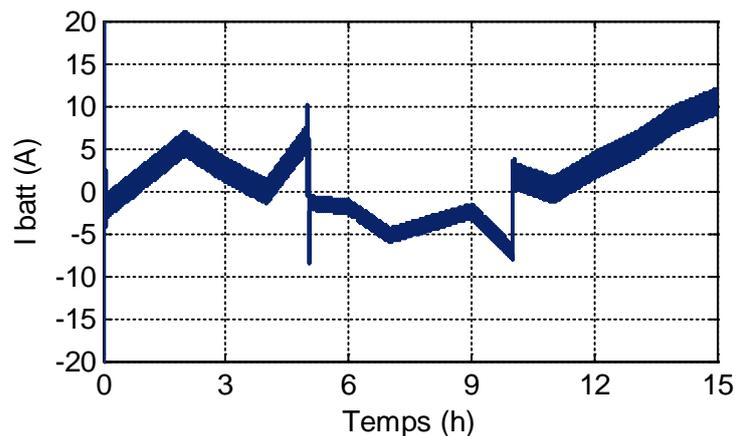
**Figure III.27:** L'allure de la puissance hybride.

La figure (III.28) montre la variation temporelle de puissance hybride en fonction du temps. On remarque que la puissance hybride est la somme des deux puissances éolienne et photovoltaïque.



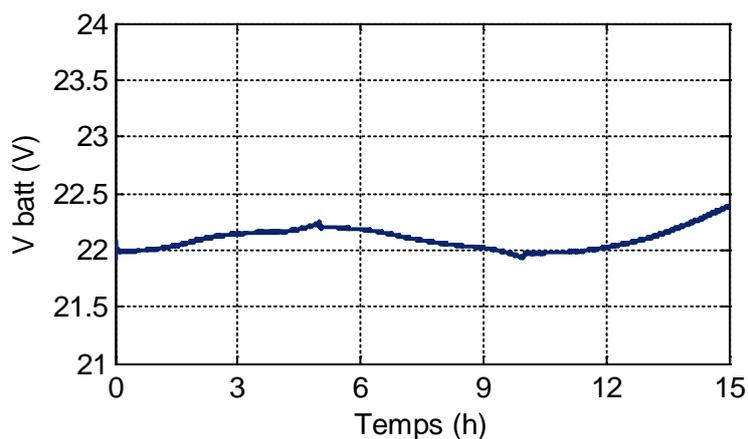
**Figure (III.28):** L'allure de la puissance hybride et de la puissance de charge.

La figure (III.28) montre la variation temporelle de la puissance hybride fournie par le système, ainsi que l'évolution de la puissance de la charge en fonction du temps, tel que la puissance consommée par la charge reste constante tout au long du temps de simulation et est égale à 700W, tandis que la puissance hybride fournie par le système varie tout au long du temps de simulation.



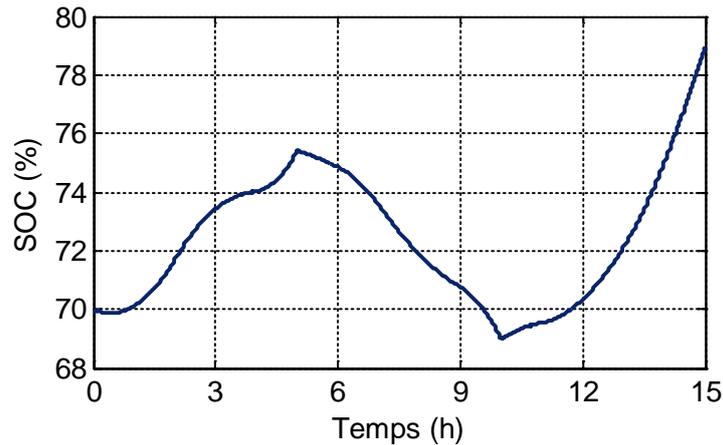
**Figure III.29:** L'allure du courant de la batterie.

La figure (III.29) montre la variation temporelle du courant dans la batterie en fonction du temps. On remarque que l'évolution du courant dans la batterie suit l'évolution de la puissance hybride tout au long du temps de simulation.



**Figure (III.30):** L'allure de la tension dans la batterie.

La figure (III.30) montre l'évolution de la tension dans la batterie en fonction du temps. Initialement la batterie est chargée sous une tension de 22V, puis elle varie légèrement tout au long du temps pour atteindre par la suite une valeur qui se rapproche de 22.5V.



**Figure (III.31):** Etat de charge de la batterie.

La figure (III.31) illustre l'état de charge et de décharge de la batterie. On remarque que la batterie est initialement chargée à 70% et effectue des cycles de charge et de décharge ensuite pour finalement atteindre les 78%.

### III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons obtenu les résultats de simulation des deux systèmes éolien et photovoltaïque avec batterie de stockage suivis de la simulation du système global. Ces résultats ont révélé un bon comportement face aux variations climatiques. Et nous avons constaté que les batteries de stockage sont susceptibles de subir des cycles de charge et de décharge.

# *Chapitre IV*

*Etude d'un système d'énergie hybride  
appliqué au pompage*

## IV.1. Introduction

Ce chapitre consiste à étudier les performances d'un système de pompage hybride (éolien-photovoltaïque), muni de batteries de stockage. La pompe utilisée est alimentée par un onduleur monophasé.

L'acquisition de données a été effectuée à l'aide du Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench appelé couramment « Labview ».

### IV.2.1. Description de la carte d'acquisition de données

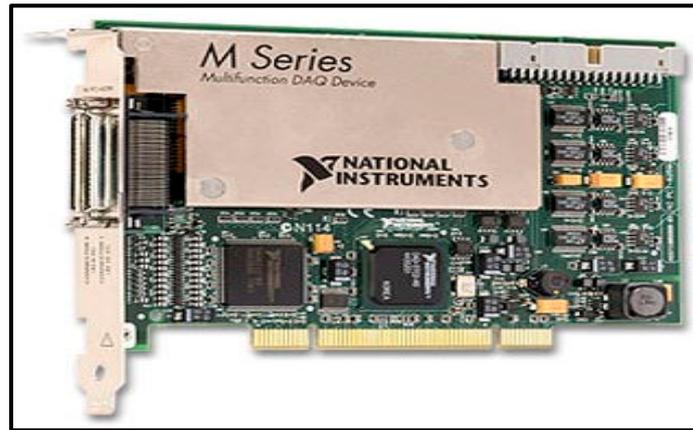
L'acquisition de données du système étudié s'effectue en exploitant une carte d'acquisition de type **PCI** de référence **NI-6259** et évidemment le logiciel Labview. Cette carte d'acquisition de données choisie est dite multifonction à haute vitesse de série «M», optimisée pour une irréprochable précision aux fréquences d'échantillonnage élevée.

«NI» représente le nom du constructeur National Instrument, «PCI» réfère au port de communication avec le micro-ordinateur et «6259» est le numéro de classement de la carte [19].

### IV.2.2. Caractéristiques de la carte d'acquisition de données

Les caractéristiques de la carte d'acquisition utilisée au niveau du laboratoire L.T.I.I sont [08]:

- 32 entrées analogiques de 16 bits, 1 Méch. /s (multivoie), 1.25 Méch. /s (monovoie).
- 4 sorties analogiques de 16 bits, 2.8 Méch. /s ; 48 E/s numériques ; compteurs de 32 bits.
- Certificat d'étalonnage du NIST (National Institute of Standards and Technology) et plus de 70 options de conditionnement de signaux.
- Technologie d'étalonnage NI-Mcal pour une précision de mesure accrue E/S numérique corrélée (32 voies cadencées, 10MHz) ; déclenchement analogique et numérique.
- Précision de mesure, une résolution et une sensibilité accrue.
- Elle est accompagnée par son propre logiciel interactif d'enregistrement de données NI Labview.



**Figure IV.1** : Carte d'acquisition de données.

### **IV.2.3. Software de la carte d'acquisition de données**

La carte d'acquisition dépend du logiciel Labview, pour acquérir les différentes données et les traiter sur micro-ordinateur.

L'objectif initial de « NI » est de concevoir du matériel d'acquisition destiné au marché des micro-ordinateurs. Ainsi la première version du Labview permet à l'utilisateur de créer des instruments virtuels à l'aide du matériel d'acquisition NI pour reproduire sur un micro-ordinateur le comportement d'un instrument personnalisé et probable d'être volontairement modifié.

### **IV.2.4. Le concept d'instrument virtuel**

L'utilisation d'une carte d'acquisition ou d'un périphérique d'acquisition à pour rôle d'acquérir un signal électrique de l'extérieur, généralement à partir de capteur ou d'un ensemble de capteurs, aussi d'effectuer un traitement et d'enregistrer dans un fichier ou une base de données, ensuite réaliser une restitution à l'écran via une interface graphique et éventuellement effectuer un ensemble d'actions sur le monde extérieur à l'aide d'actionneurs.

Les variations dépendent des besoins et de leurs évolutions.

L'instrument virtuel présente l'avantage d'être habilité de toute modification et évolution de la part de l'utilisateur [08].

## **IV.3. Modèles mathématiques du système de pompage hybride**

### **IV.3.1. Modèles mathématiques de la pompe**

Pour une hauteur manométrique  $h$  spécifiée, le modèle proposé relie directement la puissance électrique utile  $P$  en fonction du débit d'eau de la pompe  $Q$ . La relation du modèle est défini comme suit [30, 31] :

$$P(Q, h) = a(h)Q^3 + b(h)Q^2 + c(h)Q + d(h) \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

$a(h), b(h), c(h)$  et  $d(h)$  : Sont des paramètres qui dépendent de la hauteur manométrique, ajustés par une méthode numérique (Newton - Raphson) et leurs relations mathématiques sont données ci-dessous :

$$a(h) = a_0 + a_1h^1 + a_2h^2 + a_3h^3 \quad (\text{IV.2})$$

$$b(h) = b_0 + b_1h^1 + b_2h^2 + b_3h^3 \quad (\text{IV.3})$$

$$c(h) = c_0 + c_1h^1 + c_2h^2 + c_3h^3 \quad (\text{IV.4})$$

$$d(h) = d_0 + d_1h^1 + d_2h^2 + d_3h^3 \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

$a_i, b_i, c_i$  et  $d_i$  : Des constantes qui ne dépendent que du type du sous-système de pompage photovoltaïque – éolien.

### IV.3.2. Données de base

Nous donnerons dans ce qui suit une définition des données utilisées en pompage en général et nous expliquerons la particularité du pompage photovoltaïque - éolien.

#### IV.3.2.1. Le Débit

Le débit d'eau de la pompe est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. Le débit est donné en litre par heure  $[l/h]$  ou en mètre cube par jour  $[m^3/s]$ .

#### IV.3.2.2. La Hauteur manométrique totale

La hauteur manométrique totale (HMT) est la différence de pression en mètre de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement, elle peut être calculée comme suit :

$$HMT = H_g + P_c \quad (\text{IV.6})$$

Avec :

$H_g$  : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation.

$P_c$  : Pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites. Ces pertes dépendent de la distance des conduites ( $L$ ), de leurs diamètres ( $d_c$ ) et du débit de la pompe

( $Q$ ) et s'expriment en mètre de colonne d'eau. Le diamètre des conduites ( $d_c$ ) doit être calculé afin que les pertes de charge  $P_c$  correspondent au plus à 10% de la HMT [07].

### IV.3.2.3. Le Niveau statique

Le niveau statique ( $N_s$ ) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage [07].

### IV.3.2.4. Le Niveau dynamique

Le niveau dynamique ( $N_d$ ) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen. La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement [07].

## IV.4. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

La puissance hydraulique nécessaire pour faire déplacer l'eau d'un point a un autre est donnée par [07] :

$$P_h = \rho * g * HMT * Q \quad (IV.7)$$

$P_h$ : Puissance communiquée au fluide par la pompe ( $W$ ).

$g$ : Accélération de la pesanteur ( $9.81m/s^2$ ).

$HMT$ : Hauteur manométrique totale atteinte par la pompe ( $m$ ).

$Q$ : Débit volumique ( $m^3/s$ ).

$\rho$ : Masse volumique de l'eau ( $1000Kg/m^3$ ).

## IV.5. Calcul de l'énergie journalière requise

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une hauteur précise pendant une journée est calculée à partir de données de débit et de hauteur manométrique totale requise et s'exprime en ( $Wh$ ).

Cette énergie dépend d'une constante hydraulique  $C_h$  et est inversement proportionnelle au rendement du groupe motopompe utilisé [07].

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{ele} = \frac{C_h * Q * HMT}{R_{mp}} \\ R_{mp} = \frac{\rho * g * Q * HMT}{3600 * P_{hyb}} \end{array} \right. \quad (IV.8)$$

$E_{ele}$  : Est habituellement exprimé en  $kWh$ .

Où :

$$C_h = \frac{g * \rho}{3600} \quad (IV.9)$$

$$C_h = \frac{10^3 * 9.81}{3600} \quad (IV.10)$$

$g$ : Constante de la gravité ( $9.81 m/s^2$ ).

$\rho$ : Masse volumique de l'eau.

$R_{mp}$  : Rendement du groupe motopompe.

## IV.6. Description du système de pompage étudié

Notre système est constitué d'une éolienne de  $1kW$ , associée à 6 panneaux photovoltaïques montés en parallèle de  $175W_c$  chacun, débitant sur un bac de batterie de  $24V$ , en utilisant un onduleur monophasé de  $220V$ . Ce système est connecté à une pompe immergée monophasée.

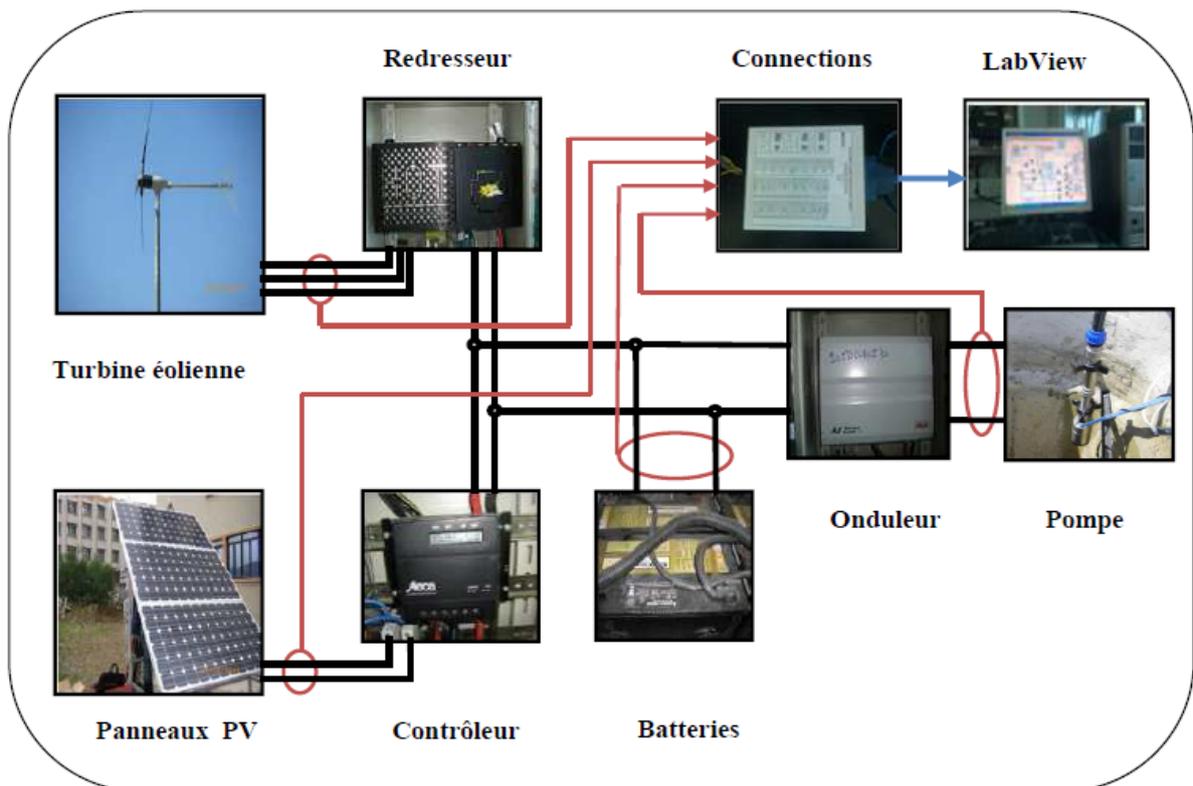


Figure IV.2 : Système de pompage hybride étudié.

### IV.6.1. Résultats expérimentaux

Les résultats de simulation sont obtenus pour différentes hauteurs manométriques :

Pour  $HMT = 3.5 m$  :

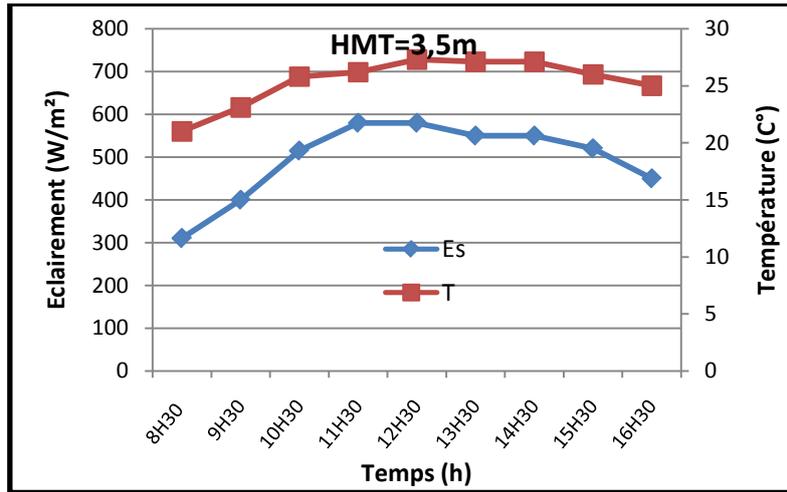


Figure IV.3 : Variation de l'éclairement et de la température en fonction de la journée.

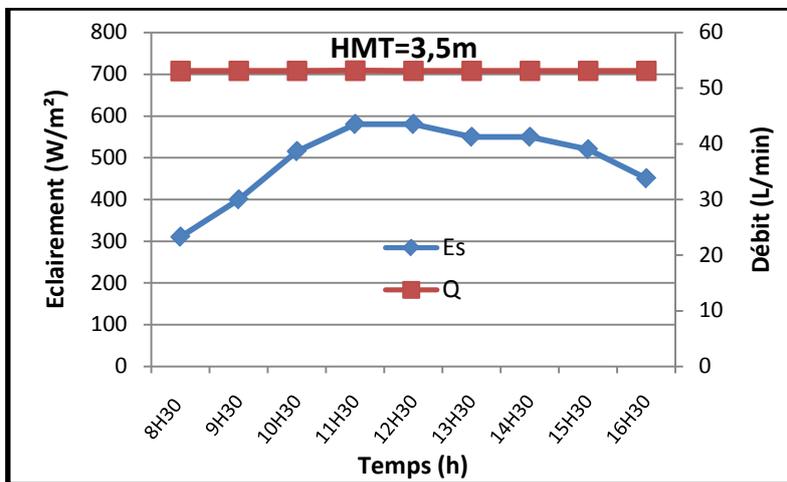


Figure IV.4 : Variation de l'éclairement et du débit en fonction de la journée.

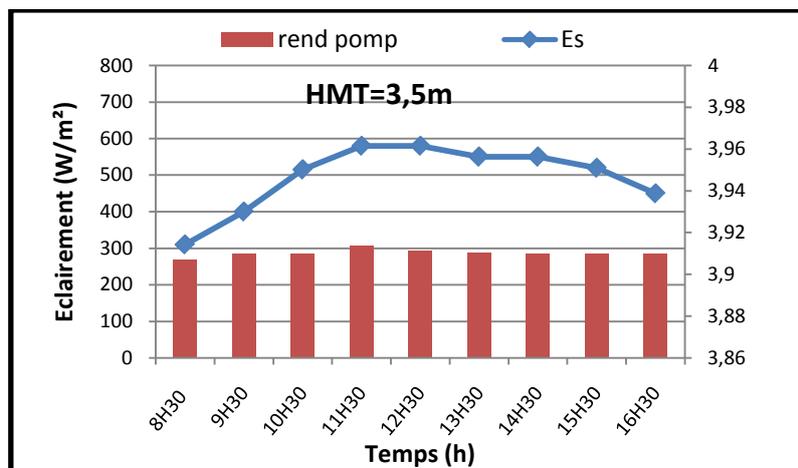


Figure IV.5 : Variation de l'éclairement et du rendement de la pompe en fonction de la journée.

Pour  $HMT = 11\text{ m}$  :

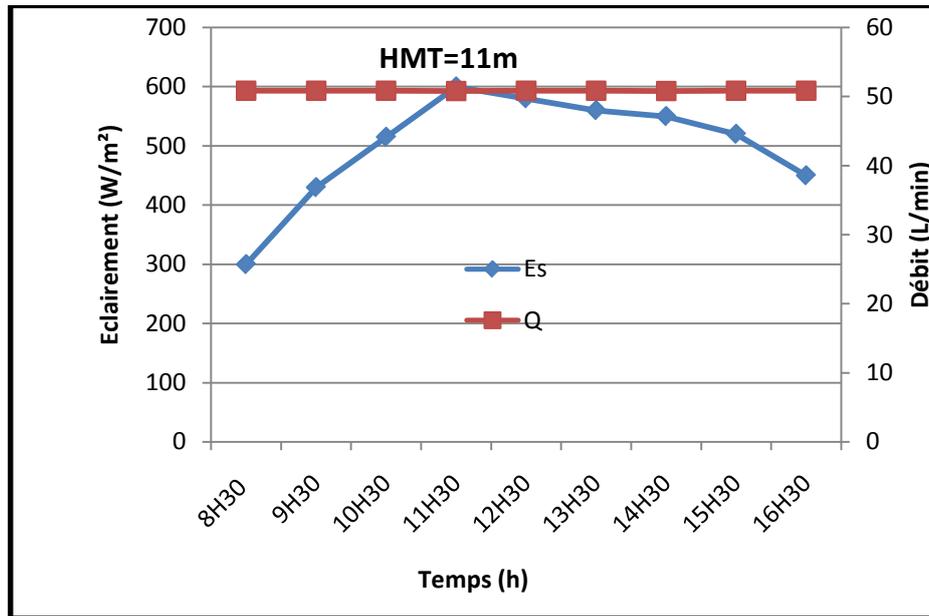


Figure IV.6 : Variation de l'éclairement et du débit en fonction de la journée.

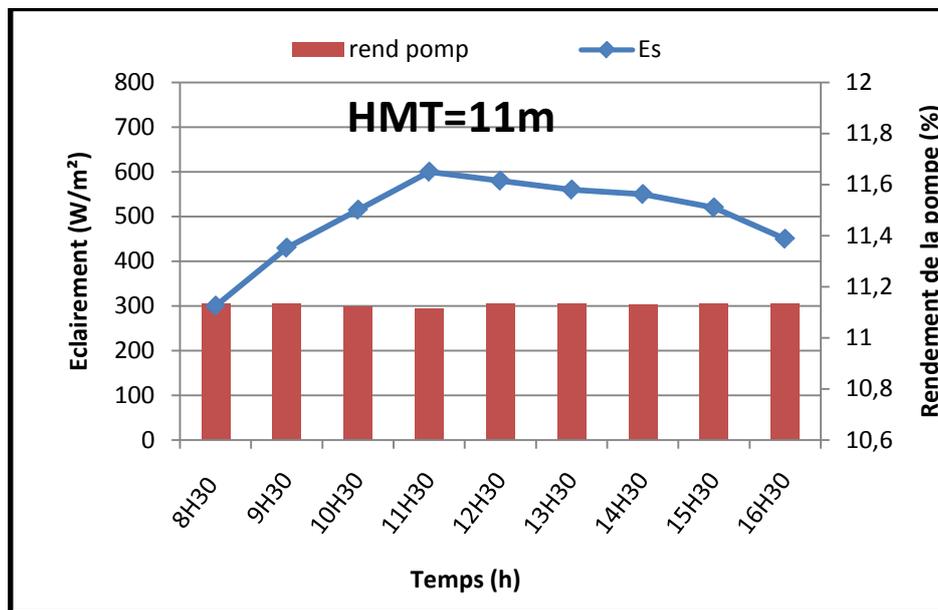
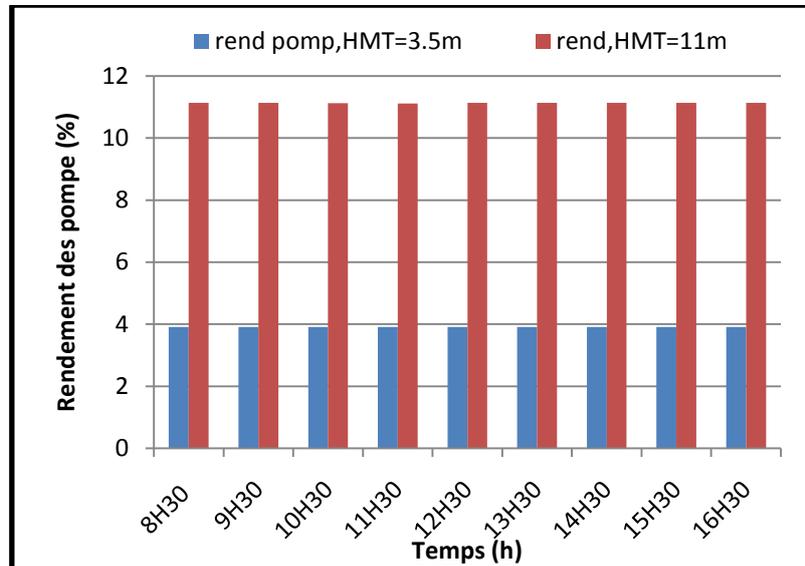
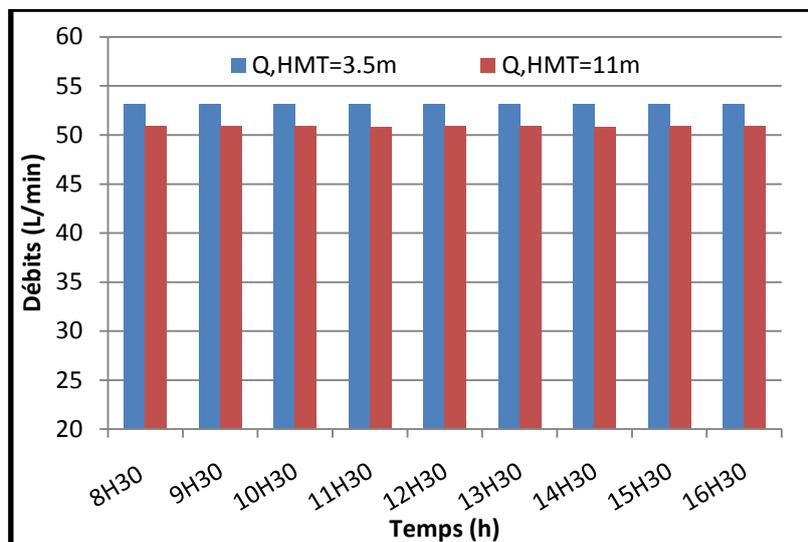


Figure IV.7 : Variation de l'éclairement et du rendement de la pompe en fonction de la journée.

### Comparaison des résultats pour différentes hauteurs



**Figure IV.8:** Evolution des rendements de la pompe selon les différentes hauteurs.



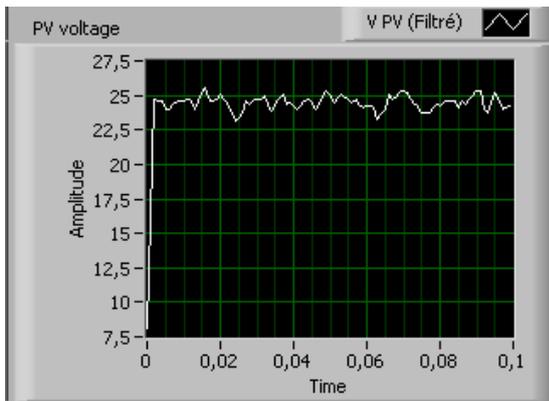
**Figure IV.9 :** Evolution des débits de la pompe selon les différentes hauteurs.

A partir des figures (IV.8) et (IV.9), on constate que l'ensoleillement n'a aucune influence sur les performances du système, et ces dernières restent constantes. On remarque aussi que les valeurs du débit et du rendement du groupe motopompe augmentent lorsque la hauteur diminue mais restent presque constantes tout au long de la journée cela est dû à la tension

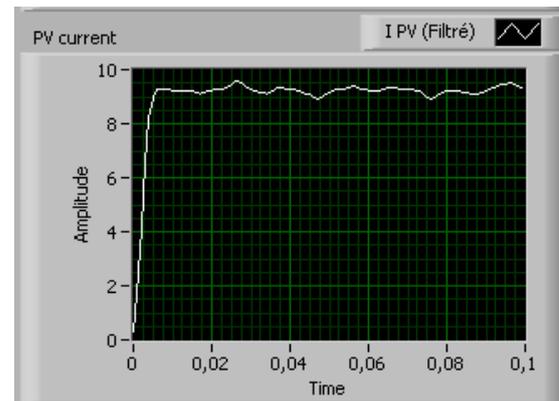
d'alimentation qui est imposée par les batteries qui constituent l'entrée de l'onduleur monophasé.

➤ Résultats obtenus lors de tests du système de pompage :

- Photovoltaïque :

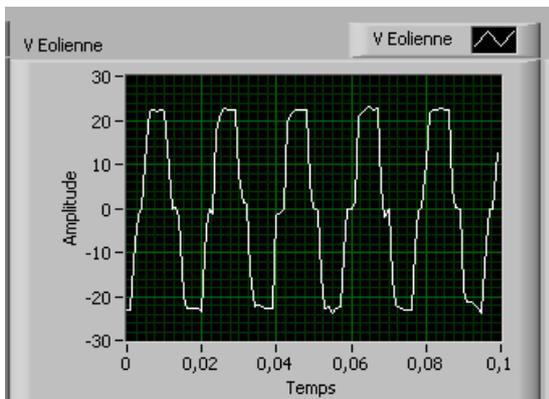


**Figure IV.10 :** Tension photovoltaïque.

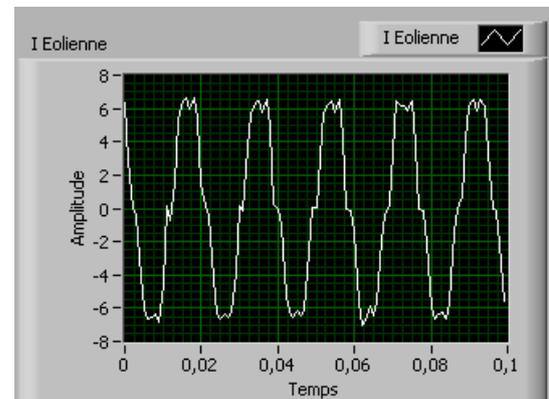


**Figure IV.11 :** Courant photovoltaïque.

- Eolien :

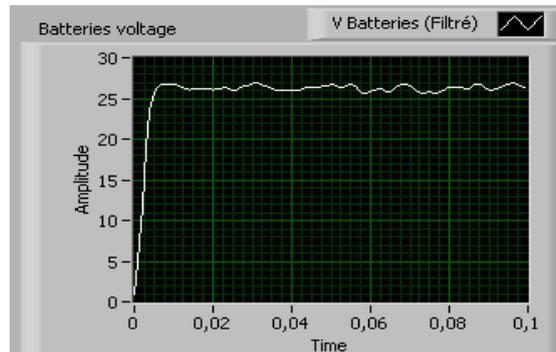


**Figure IV.12 :** Tension éolienne.



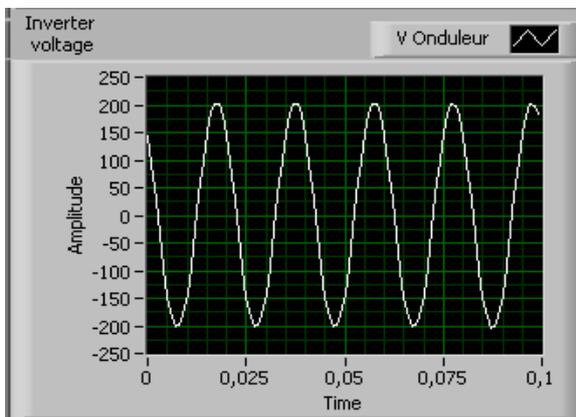
**Figure IV.13 :** Courant éolienne.

- Batterie :

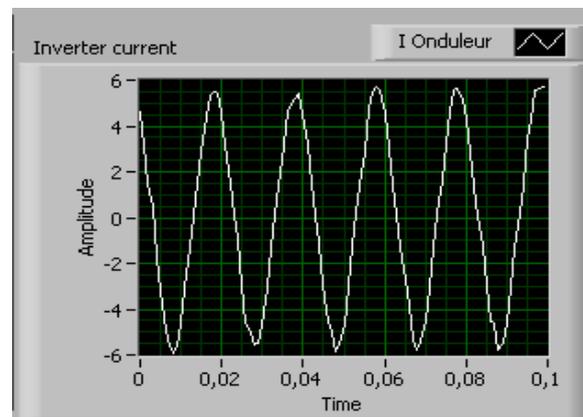


**Figure IV.14:** Tension de la batterie.

- Onduleur :



**Figure IV.15 :** Tension de l'onduleur.



**Figure IV.16 :** Courant de l'onduleur.

## IV.7. Conclusion

Pour le bon fonctionnement du système de pompage et dans le but d'avoir des meilleurs rendements ce chapitre a été consacré pour la description d'un système de pompage hybride (éolien-photovoltaïque) avec stockage. Pour obtenir les caractéristiques électriques du système étudié, nous avons utilisé le logiciel Labview.

# *Conclusion générale*

### Conclusion générale :

Pour assurer un fonctionnement continu à une installation durant toute l'année, on envisage l'utilisation d'un système d'appoint à base d'énergie hybride.

Si les générateurs hybrides proposent des solutions technologiques complexes comparés aux solutions courantes mono-sources, paradoxalement ils offrent une flexibilité incomparable, une souplesse de fonctionnement et un prix de revient attractif.

Dans ce contexte, le travail de recherche présenté dans ce mémoire traite l'étude d'un système hybride (éolien-photovoltaïque) avec système de stockage.

Le premier chapitre de ce travail porte sur un état de l'art sur les énergies renouvelables. Pour un développement écologique et économique, et pour une meilleure complémentarité la combinaison choisie porte sur un système hybride composé de panneaux photovoltaïques, d'une éolienne et de batteries de stockage, avec gestion de puissance du système de pompage appliqué.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de chaque composant de chaque chaîne de conversion du système hybride, voir la chaîne de conversion photovoltaïque composée de 6 panneaux connectés en parallèle de  $175 W_c$  chacun, de type Sharp débitant sur un régulateur de charge, à la sortie duquel un banc de batterie de  $105 Ah - 24 V$  chacune. La chaîne de conversion éolienne se compose d'une turbine éolienne de  $1kw$  fonctionnant avec une génératrice synchrone à aimants permanents, débitant sur un redresseur à diodes et des batteries de stockage. Ensuite, on a procédé à la modélisation de la charge caractérisée par un groupe moteur- pompe.

Le troisième chapitre, destiné à la simulation sous Matlab/Simulink, d'abord du système éolien, ensuite du système photovoltaïque pour poursuivre avec le système hybride global.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude des performances d'un système de pompage hybride (photovoltaïque-éolien), l'étude de l'influence de l'ensoleillement et de la température et les différents paramètres électriques.

Ce travail nous a permis :

- De faire une description sur les systèmes d'énergies renouvelables (photovoltaïque et éolien).
- De modéliser puis de simuler d'abord les deux chaînes de conversion éolienne et photovoltaïque, pour ensuite passer au système hybride global.

- D'acquérir des données expérimentales grâce au système d'acquisition de données implémenté sur LabView appliqué à un système de pompage qui nous a permis de contrôler notre système a tout instant.

Comme perspectives, il serait intéressant d'intégrer la simulation du système de pompage, aussi exploiter les caractéristiques du débitmètre dans l'acquisition des données.

# *Référence bibliographique*

## Référence bibliographique

---

- [01] A.D. Bagul, Z.M. Salameh, B. Borowy, «Sizing of a Stand-Alone Hybrid Wind-Photovoltaic System Using a Three-Event Probability Density Approximation», revue Solar Energy, Vol. 56,N°4, pp. 323-335, 1996.
- [02] J.K. Kaldellisa,\_, K.A. Kavadiasa, P.S. Koronakis, «Comparing wind and photovoltaic standalone power systems used for the electrification of remote consumers», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol:11, pp: 57-77, 2007
- [03] M. MEZZAI, S. MOULODJI, «Contribution à l'étude d'un Systèmes de Pompage photovoltaïque» mémoire master II de l'université de Bejaia, 2014.
- [04] A. Labouret, M. Viloz, « Energie solaire photovoltaïque ». Le manuel du professionnel, édition DUNOD, août 2003, Paris (France).
- [05] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sadasy, « Le pompage photovoltaïque » Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Éditions Multi Mondes, 1998.
- [06] A. HAMIDAT, B. BENYOUCEF and T. HARTANI, « Small-scall irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions ». Renewable Energy, Vol. 28, pp. 1081 1096, 2003.
- [07] A. MOHAMMEDI « Etude d'un système de pompage photovoltaïque » Master en électrotechnique option : Electromécanique. Université de Bejaia, année 2010.
- [08] L. LAZARI, N. MEBARKI, «Etude d'un système photovoltaïque», Mémoire Master2, de l'université de Béjaia, 2014.
- [09] E. Golding, The generation of electricity by wind power, Haldsted Press, New York, 1976.
- [10] Le Gourrière, Désiré, Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations Paris, Editions Eyrolles, 1980.
- [11] S. Hamdouche, « Contribution à l'alimentation des structures de régulation des courants des machines à courant alternatif », Mémoire de Magister en Electromécanique, option Electronique de puissance, Université de Batna, Algérie, 2007.
- [12] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechnye, « éoliennes ». Technique de l'ingénieur, vol. BM4640, janvier 2011.
- [13] L. Menasri, I. Menasri, « étude d'un système Eolien Autonome basé sur une génératrice asynchrone avec stockage », Mémoire de fin d'études, option Electromécanique, Université de Bejaia. Algérie, 2008.
- [14] A. Miricki, « Etude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse de doctorat de l'institut national de polytechnique de Toulouse France [2005].

## Référence bibliographique

---

- [15] O. Gergoud, « Modélisation énergétique et optimisation économique associée à un accumulateur », Thèse de doctorat de l'ENS de Cachan France [2002].
- [16] B. Multon, « Etat de l'art des Aérogénérateurs Electriques », Techniques de l'Ingénieur, Ref D3960, Vol D7, 2004.
- [17] H. Kasbadji Merzouk, « Evaluation du Gisement Energétique Eolien, contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de doctorat en Physique Energétique et Matériaux, Université de Tlemcen, 2006.
- [18] L. Styanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », Thèse de doctorat de l'université de technique de Sofia, 2011.
- [19] Tiar Mourad, « commande optimale d'un système de génération photovoltaïque hybride », soutenue le 10-10-2011.
- [20] M. Belhamel, S. Moussa et A. Kaabache, « Production d'électricité au Moyen d'un système hybride (éolien-photovoltaïque-diésel) », Revue des énergies Renouvelables, Zones Arides, 2002, PP-49-54.
- [21] Ionel Vechui, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thème de doctorat de l'université du havre, soutenue le 15 décembre 2005.
- [22] S.LALOUNI, «Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolien) », Docteur en sciences de l'université de Bejaia,2009.
- [23] C.SERIR. "Optimisation de système de pompage photovoltaïque ".Mémoire de magister. Université Abderrahmane mira de Bejaia, soutenue 2011-2012.
- [24] C.BERNARD, C.SEBRAO-OLIVEIRA, B.LAVAL et C.VAUDOUER « Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue », Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04-Energie renouvelable, Université de technologie Compiègne, 2009.
- [25] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro, «Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems», Solar Energy Materials & Solar Cells, vol: 90, N°: 11, pp: 1555 –1578, 2006.
- [26] S. Lalouni , D. Rekioua , T. Rekioua , E. Matagne «Fuzzy logic control of stand-alone Photovoltaic system with battery storage», Journal of Power Source, vol. 193, N°: 2, pp: 899–907, 2009.
- [27] Ch. Hua, J. Lin, Ch. Shen, « Implementation of a DSP-controlled PV system with peak power tracking », IEEE Trans. Industrial Electronics, vol: 45, N°: 1, pp: 99–107, 1998.
- [28] I. Vechiu. « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», Thèse de doctorat de l'université du Havre, 2005.

## Référence bibliographique

---

- [29] A.T. Singo «Système Alimentation Photovoltaïque Avec Stockage Hybride Pour L'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat de L'université Henri Poincaré, Nancy1, France, 2010.
- [30] A. Hamada, 'Simulation des Systèmes de Pompage Photovoltaïques Destinés pour L'Alimentation et Eau Potable et pour la Petite Irrigation', Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen, 2004.
- [31] A. Hamidat, 'Simulation of the Performance and Cost calculations of the Surface Pump', Renewable Energy, Vol. 18, pp. 383 - 392, 1999.

# Annexes

**Tableau1****Paramètres de la turbine :**

Paramètres	Valeurs
Puissance nominale	1000 <i>W</i>
Nombre de pales	3
Rayon de la turbine	2.1 <i>m</i>
Vitesse minimale de la turbine	3.4 <i>m/s</i>
Vitesse maximale de la turbine	12.5 <i>m/s</i>