

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Science de l'ingénierie

Département : Electromécanique

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

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

Présenté par : *Kraimia Adel*

Encadrant : *Benretem Abdelouahab*

*Professeur*

*Annaba*

### Jury de Soutenance :

Berkani Mahieddine	MCA	Annaba	Président
Benretem Abdelouahab	Professeur	Annaba	Encadrant
Tolba Salah	MCB	Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

## *Remerciements*

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

*Je remercie vivement en premier lieu mon encadreur Monsieur : **A.BENRETEM**, professeur à l'université d'Annaba, qui par sa compétence, ses encouragements et ses conseils, j'ai réalisé ce travail.*

*Je remercie profondément Mr **M.KRIM** enseignant à l'université d'Ain Témouchent, pour son aide constante et son disponibilité sans limite tout au long de ce travail.*

*Mes remerciements vont également aux membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes chère parents symbole de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel, que dieu les protègent pour moi et leur accordent une bonne santé et une longue vie.*

*Mes chères sœurs.*

*Mes enseignants depuis mon enfance.*

*Mes amis (es) et mes collègues.*

*A tout ceux qui m'on aidé à réaliser de près ou de loin ce mémoire.*

***Adel***

# *Sommaire*

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

## CHAPITRE I : Généralités sur les énergies renouvelables

I. Introduction.....	3
I.1. État de l'art sur les systèmes hybrides à énergies renouvelable.....	3
I.2. Evaluation des énergies renouvelables en Algérie.....	5
I.3. Energie solaire photovoltaïque.....	5
I.3.2. Effet photovoltaïque.....	6
I.4. Électricité solaire par effet photovoltaïque.....	6
I.4.1. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	6
I.4.2. Les différents types de cellules photovoltaïques.....	7
I.4.2.1. Les cellules monocristallines.....	7
I.4.2.2. Les cellules polycristallines.....	7
I.4.2.3. Les cellules amorphes.....	8
I.4.3. Schématisation simplifiée d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.4.4. Association des cellules photovoltaïques.....	10
I.4.4.1. Association en série.....	10
I.4.4.2. Association en parallèle.....	10
I.4.4.3. Association mixte (en série et en parallèle).....	11
I.4.5. Systèmes photovoltaïques.....	12
I.4.5.1. Systèmes autonomes.....	12
I.4.5.2. Systèmes raccordés au réseau.....	12
I.4.6. Avantages et inconvénients des générateurs photovoltaïques.....	13
I.5. Energie éolienne.....	13
I.5.2. Constitution d'une éolienne :.....	14
I.5.3. Différents types d'aérogénérateurs.....	15
I.5.3.1. Eoliennes à axe vertical.....	15
I.5.3.2. Eoliennes à axe horizontal.....	16
I.5.4. Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur.....	17
I.6. Système d'énergie hybride (S.E.H).....	18
I.6.3. Configuration du bus dans les systèmes hybrides.....	19
I.6.3.1. Architecture à bus continu CC.....	19

I.6.3.2. Architecture à bus alternatif AC .....	19
I.6.4. Gamme de la puissance.....	20
I.6.5. Le choix de la chaîne de conversion d'énergie .....	20
I.6.6. Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien.....	21
I.6.7. Principaux composants du Système d'énergie hybride photovoltaïque -éolien.....	21
I.6.8. Descriptions des composants du système hybride photovoltaïque-éolien .....	22
I.6.9. Avantages et inconvénients d'un système hybride .....	25
I.7. Conclusion .....	25

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

II.1. Introduction .....	26
II.2. Structure de la chaîne de conversion photovoltaïque .....	26
II.3. Modélisation du panneau photovoltaïque.....	26
II.4. Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque .....	29
II.4.1. Caractéristique Courant-Tension.....	29
II.4.2. Caractéristique puissance –tension.....	30
II.5. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV .....	31
II.5.1. Influence de la température .....	31
II.5.2. Influence de l'intensité du rayonnement .....	33
II.6. Modèle d'un hacheur survolteur (Boost).....	34
II.7. Modélisation de la batterie .....	35
II.8. Modélisation de la chaîne de production éolienne .....	36
II.8.1. Modélisation de la vitesse du vent.....	37
II.8.2. Modélisation de la turbine .....	37
II.8.3. Modèle des pâles .....	39
II.8.4. Le multiplicateur de vitesse.....	39
II.8.5. Equation dynamique de l'arbre de transmission.....	40
II.9. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents.....	40
II.10. Le redresseur PD3 à diode.....	44
II.11. Bus Continu .....	44
II.12. Conclusion .....	45

<b>CHAPITRE III : Evaluation du système hybride photovoltaïque éolien avec batteries</b>	
III.1 Introduction .....	46
III.2. Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque.....	46
III.2.1. Résultats de la simulation.....	46
III.3. Simulation de la chaine de conversion éolienne .....	48
III.3.1. Résultats de la simulation.....	49
III.4. le système hybride étudié .....	51
III.4.1. Le model du système hybride global éolien photovoltaïque avec stockage.....	52
III.4.2. Résultat de la simulation .....	53
III.5. conclusion : .....	59
Conclusion générale .....	60

**Références bibliographiques**

**Annexes**

# *Liste des figures*



CHAPITRE I : Généralités sur les énergies renouvelables

Figure I.1 : Système Photovoltaïque .....	5
Figure I.2: Schéma synthétique de l'effet photovoltaïque .....	6
Figure I.3: Cellule photovoltaïque (monocristalline).....	6
Figure I.4 : Cellule PV polycristalline. Source: Wikipédia.....	7
Figure I.5 : Schéma d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure I.6 : Cellules ou modules photovoltaïques en série .....	10
Figure I.7: Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle. ....	10
Figure I.8 : Schéma de connexion des cellules solaires en série et parallèle .....	11
Figure I.9: Installation photovoltaïque autonome. ....	12
Figure I.10 : Installation photovoltaïque couplée au réseau.....	12
Figure I.11 : Eléments constituant une éolienne .....	14
Figure I.12 : Eolienne à axe vertical la Savonius .....	15
Figure I.13 : Eolienne à axe vertical la Darrieus .....	16
Figure I.14 : Eolienne à axe horizontal .....	16
Figure I.15 : Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique .....	17
Figure I.16: Architecture des systèmes hybrides d'énergie .....	18
Figure I.17: configuration du système hybride à bus continu .....	19
Figure I.18: configuration du système hybride à bus alternatif.....	20
Figure I.19 : Schéma synoptique du système hybride étudié. ....	21
Figure I.20: Caractéristiques $I=f(v)$ sous obscurité et sous éclaircissement .....	23

CHAPITRE II : Modélisation des composants du système hybride

Figure II.1: Différents constituants de la chaîne de conversion photovoltaïque.....	26
Figure II.2: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode. ....	27
Figure II.3: Schéma bloc du GPV. ....	27
Figure II.4: Caractéristique $IPV = f(VPV)$ d'un module photovoltaïque. ....	30
Figure II.5: Courbe $PPV = f(VPV)$ d'un module photovoltaïque. ....	31
Figure II.6: Caractéristique courant-tension pour différentes températures.....	32
Figure II.7: Caractéristique puissance-tension pour différentes températures. ....	32
Figure II.8: L'influence de l'éclaircissement sur la caractéristique $IPV=f(VPV)$ .....	33
Figure II.9: Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements.....	33
Figure II.10: Circuit électrique du convertisseur DC-DC. ....	34
Figure II.11: Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [0, \alpha. T]$ . ....	34
Figure II.12: Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [\alpha. T, T]$ .....	35
Figure II.13: Modèle R-C de la batterie. ....	36
Figure II.14: Schéma synoptique de l'aérogénérateur.....	37
Figure II.15: Système de la turbine à modéliser.....	38
Figure II.16: Courbe $CP(\lambda)$ .....	39
Figure II.17: Structure de la génératrice synchrone. ....	41
Figure II.18: Développement des enroulements de la génératrice synchrone suivant le .....	42
Figure II.19: Le redresseur PD3 à diode .....	44
Figure II.20: Schéma d'un bus continu. ....	45

CHAPITRE III : Evaluation du système hybride photovoltaïque éolien avec batteries

Figure III.1: Schéma Bloc du système photovoltaïque. ....	46
Figure III.2: la courbe du courant photovoltaïque.....	47
Figure III.3: la courbe de la tension photovoltaïque. ....	47
Figure III.4: la courbe de la puissance photovoltaïque. ....	48
Figure III.5 : Schéma Bloc du système éolien. ....	49
Figure III.6 : Profil du vent admissible par la turbine [m/s].....	50
Figure III.7: le courant statorique à la sortie de l'éolienne (a).....	50
Figure III.8: la tension statorique à la sortie de l'éolienne (a).....	51
Figure III.9: la courbe du courant redressé [A]. ....	52
Figure III.10: Système hybride étudié.....	52
Figure III.11: Schéma Bloc du système hybride. ....	53
Figure III.12: Profil du vent. ....	54
Figure III.13: L'allure du puissance de la turbine éolienne. ....	55
Figure III.14: Variation temporelle de l'ensoleillement (W/m2).....	55
Figure III.15: L'allure de la température [°C]. ....	56
Figure III.16: Puissance photovoltaïque du système.....	57
Figure III.17: puissance hybride.....	58
Figure III.18: L'allure de la puissance hybride et de la puissance de charge.....	59

*Liste des symboles et  
Abréviations*

## Liste des symboles et abréviations

---

**SEH** : Système d'énergie hybride.

**PV** : Photovoltaïque.

**CC** : Courant continu.

**CA** : Courant alternatif.

**E<sub>ph</sub>** : Représente la quantité d'énergie,

**$\lambda$**  : La longueur d'onde

**h** : La constante de Planck

**C** : La vitesse de la lumière

**R<sub>S</sub>** : Résistance série [ $\Omega$ ].

**R<sub>Sh</sub>** : Résistance en dérivation ou shunt [ $\Omega$ ].

**G<sub>M</sub>** : Multiplicateur de vitesse.

**G<sub>E</sub>** : Génératrice électrique.

**C<sub>S</sub>** : Convertisseur statique.

**I<sub>ph</sub>** : Densité de courant photogénéré.

**I<sub>obs</sub>** : Densité de courant d'obscurité.

**P<sub>PV</sub>** : Puissance photovoltaïque [W].

**I<sub>PV</sub>** : Le courant fournit par la cellule photovoltaïque [A].

**V<sub>PV</sub>** : La tension continue donnée par la cellule photovoltaïque [V].

**I<sub>D</sub>** : Le courant traversant les diodes [A].

**I<sub>P</sub>** : Le courant traversant la résistance parallèle [A].

**E<sub>S</sub>** : L'ensoleillement [ $W/m^2$ ].

**E<sub>Sréf</sub>** : L'ensoleillement de référence [ $W/m^2$ ].

**T<sub>j</sub>** : La température de jonction de la cellule [ $^{\circ}C$ ].

**T<sub>jréf</sub>** : La température de jonction de référence [ $^{\circ}C$ ].

**T<sub>a</sub>** : La température ambiante [ $^{\circ}C$ ].

**N<sub>OCT</sub>** : La température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire [ $^{\circ}C$ ].

**P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>** : Paramètres constants.

**I<sub>0</sub>** : Courant de saturation de la diode [A].

**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<sub>S</sub>** : Nombre total de cellules connectées en séries et/ou en parallèles.

**E<sub>g</sub>** : Energie de gap [ $1.76. 10^{-19}$ ].

**C** : Condensateur.

## Liste des symboles et abréviations

---

$D$  : Diode.

$L$  : Inductance.

$V_e$  : La tension d'entrée [V].

$V_L$  : La tension aux bornes de l'inductance  $L$  [V].

$I_R$  : Le courant traversant la 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 [ $\Omega$ ].

$R_S$  : Résistance série [ $\Omega$ ].

$R_P$  : Résistance parallèle [ $\Omega$ ].

$T$  : La période de hachage [s].

$\alpha$  : Rapport cyclique.

$V_{CO}$  : La tension à vide [V].

$I_{CC}$  : Le courant de court-circuit [A].

$P_{opt}$  : Puissance au point de puissance maximale [W].

$V_{opt}$  : Tension au point de puissance maximale [V].

$I_{opt}$  : Courant au point de puissance maximale [A].

$E_0$  : 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].

$C_{bat}$  : La capacité nominale de la batterie [Ah].

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

$V_V$  : La vitesse instantanée du vent [m/s].

$T_t$  : Le couple développé par la turbine éolienne [N.m].

$P_V$  : Puissance de la turbine [W].

$C_P$  : Coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.

$\lambda$  : Le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent.

$S$  : Surface balayée par les pales de la turbine [m<sup>2</sup>]

$\beta$  : L'angle d'orientation des pâles.

$G$  : Le gain du multiplicateur.

$t_{em}$  : Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone [N.m].

$\Omega_m$  : La vitesse mécanique de la génératrice [rad/s].

$\Omega_t$  : La vitesse de la turbine [rad/s].

$J$  : Inertie totale de l'arbre de transmission [kg.m<sup>2</sup>].

$F$  : Le coefficient de frottement dynamique [m. s/rad]

$V_{Sa,Sb,Sc}$  : 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.

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

## Liste des symboles et abréviations

---

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

$L_S$ : Inductance cyclique statorique [H].

$\phi_f$ : 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.

$V_{dc}$ : La tension redressée [V].

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

$i_{pv}$ : 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]

# *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.

L'utilisation d'un système photovoltaïque peut ne pas subvenir à lui seul aux besoins énergétiques souhaités. En effet, l'énergie éolienne ou l'énergie solaire peut nous faire défaut au moment où nous en avons le plus besoin. Pour assurer le fonctionnement d'une installation durant toute l'année, on envisage l'utilisation d'un système d'hybride. Pour un développement d'un système d'hybride et économique, nous avons intéressé par la méthode du couplage d'un système photovoltaïque - éolien (PV-E).

L'objectif de ce travail est Les systèmes de production d'énergie hybrides PV-éolien, se présentent comme l'une des options technologiques pouvant permettre d'opérer de façon progressive la transition entre les sources renouvelables (solaire et éolien). En particulier pour les zones isolées d'Afrique Subsaharienne qui disposent d'un potentiel important en ressource solaire et pour lesquelles la production d'énergie.

Pour permettre d'exploiter au mieux ces sources d'énergie, le système doit être correctement dimensionné pour qu'il puisse fournir l'énergie d'une manière continue. Le dimensionnement d'un tel système implique la détermination des caractéristiques nominales des sources et du système de stockage, pour des ressources énergétiques et des contraintes d'utilisation données.

Pour réaliser notre objectif, nous avons établi un modèle simple et fiable, avec une précision acceptable pour prévoir les performances d'un système hybride photovoltaïque-éolien avec des batteries de stockage.

Pour ce fait, une modélisation et simulation des différents éléments de système hybride solaire éolien, sont illustrés dans ce travail, après une recherche parmi les différents concepts et techniques de ces composants.



Pour cela, notre travail, sera structuré comme suit :

- Le ***premier chapitre*** présente l'état de l'art sur les systèmes hybride photovoltaïque-éolien et donne une description sur présente les deux systèmes d'énergie renouvelables telle que l'énergie photovoltaïque et éolienne. Puis on combine ces deux sous-systèmes précédents pour obtenir un système d'énergie hybride lie avec des batteries de stockage
- Le ***deuxième chapitre*** est consacré à la modélisation des composants du système hybride éolien-photovoltaïque, dans le but d'analyser sont comportement dynamique face aux variations climatiques et celles de la charges.
- Le ***troisième chapitre*** concerne l'étude de simulation et leurs performances d'un système hybride (photovoltaïque-éolien)
- ***Finalemnt***, ce travail est terminé par conclusion générale.

# *Chapitre I*

## *Généralités sur les énergies renouvelables*

## I. Introduction

Dans ce premier chapitre, nous allons décrire l'état de l'art sur les systèmes hybrides à énergies renouvelables et les différentes caractéristiques des deux énergies renouvelables étudiées dans ce travail (le solaire et l'éolien), ainsi la combinaison entre ces deux énergies pour obtenir un système hybride.

### I.1. État de l'art sur les systèmes hybrides à énergies renouvelables :

Au cours des dernières années, beaucoup de recherches ont été effectuées sur la conception, l'optimisation, le contrôle et l'opération des systèmes hybrides à énergies renouvelables. Les efforts de recherche et de développement dans les technologies d'énergie renouvelable comme le solaire, l'éolienne et d'autres sources d'énergie renouvelable doivent continuer afin d'améliorer leurs performances et fiabilité. Compte tenu des récents développements, il est clair que ce domaine prend de l'ampleur. A cause de la nature stochastique des sources d'énergies renouvelables, il est évident que les systèmes hybrides à énergies renouvelables doivent comprendre au moins un système de stockage d'énergie pour satisfaire la demande des charges à tout instant. Le système de stockage d'énergie peut être un banc de batteries, un ensemble électrolyseur et pile à combustible, un super condensateur ou la combinaison de ces systèmes de stockage.

D'après José L. et collaborateurs [1], les systèmes autonomes hybrides à énergies renouvelables sont généralement plus adaptés que les systèmes qui ont une seule source d'énergie pour l'approvisionnement en électricité des applications hors réseau, en particulier dans les zones reculées et difficiles d'accès. Ces types de systèmes démontrent une plus grande fiabilité que les systèmes simples photovoltaïque (PV) ou éolien. Les systèmes hybrides les plus utilisés sont les combinaisons PV-Éolien-Batterie et PV-Diesel Batterie. Les batteries (normalement de type plomb-acide) sont habituellement utilisées comme système de stockage. Le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène, bien que techniquement viable, a un inconvénient en terme de sa faible efficacité dans le processus de conversion électricité hydrogène-électricité, outre le fait que, sur le plan économique, il ne peut pas rivaliser avec le stockage de la batterie à l'heure actuelle [1].

Une revue de littérature a été faite par Prabodh Bajpai et Vaishalee Dash en 2012 sur les systèmes hybrides à énergies renouvelables pour la production d'électricité dans les applications autonomes [2]. Dans cette étude, les auteurs se sont fixé comme objectifs l'examen minutieux de l'état de la recherche sur le dimensionnement, l'optimisation, la gestion énergétique et la modélisation des composants des systèmes hybrides à énergies renouvelables. Ils affirment que les systèmes hybrides à énergies renouvelables peuvent fournir une alimentation ininterrompue en énergie et une émission zéro de gaz à effet de serre qui est le principal avantage de ces systèmes. L'utilisation généralisée de ces systèmes permettra non seulement de résoudre les questions énergétiques, mais aussi de garantir une planète plus verte et durable.

En 2014, Madan A. et al. [3] ont fait une revue sur l'état de la recherche sur les systèmes hybrides d'énergie. Dans leur étude, plusieurs travaux publiés par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), dans des magazines et des actes de conférences ont été analysés. Il ressort de cette étude que parmi les sources d'énergies renouvelables, l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont les sources les plus utilisées dans la production d'électricité dans de nombreux pays en développement. Plusieurs systèmes hybrides d'énergie sont analysés et une étude détaillée a été effectuée pour différentes stratégies de commande et des algorithmes d'optimisation ont été incorporés dans différentes sources d'énergie non conventionnelles. Il se trouve que beaucoup de chercheurs ont étudié par simulation et expérimentalement les systèmes hybrides d'énergie. Enfin, ils concluent que les systèmes hybrides d'énergie sont fiables, économiques et efficaces pour satisfaire les besoins en énergie.

À travers ces différentes études, nous constatons que les systèmes hybrides à énergies renouvelables constituent une solution viable, économique et efficace pour les régions éloignées, difficiles d'accès et dépourvues de réseau électrique. De ce fait, nous nous intéresserons par la suite à la combinaison de systèmes hybrides à énergies renouvelables avec des systèmes de pompage d'eau.

En 2013, une revue de littérature sur les sources d'énergies renouvelables combinées aux systèmes de pompage d'eau a été menée par C. Gopal et al. [4]. Les auteurs affirment que les sources d'énergies renouvelables pour le pompage d'eau sont identifiées comme une alternative viable pour remplacer les méthodes classiques de pompage d'eau. Les combinaisons de systèmes de pompage avec les sources d'énergies renouvelables étudiées dans cet article sont : le système de pompage photovoltaïque, le système de pompage solaire thermique, le système de pompage éolien, le système de pompage avec de la biomasse et le système de pompage avec les systèmes hybrides d'énergies renouvelables. Les performances de chacune de ces combinaisons ont été étudiées à fond et une comparaison a été effectuée entre les différentes combinaisons. Les auteurs rapportent que les performances d'un système de pompage hybride sont meilleures que celles des systèmes éolien et photovoltaïque. Ils ont également conclu que les systèmes de pompage hybrides sont adaptés pour les petits systèmes de pompage d'eau. En d'autre terme, les systèmes hybrides à énergies renouvelables pour le pompage d'eau présentent un intérêt considérable par leur flexibilité et leur souplesse de fonctionnement. Cependant, parmi les sources d'énergies renouvelables pour l'irrigation, le système de pompage photovoltaïque est largement utilisé pour l'irrigation et les applications domestiques, suivi par le système de pompage éolien. Dans cette étude, une attention particulière a été accordée au système hybride photovoltaïque éolien pour le pompage d'eau. En conclusion, d'après les auteurs, l'utilisation des sources d'énergies renouvelables dans les applications de pompage d'eau joue un rôle essentiel dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

À présent, les systèmes hybrides photovoltaïques-éoliens pour les applications de pompage d'eau sont flexibles, performants et efficaces. Un aspect qui est devenu clair, après cet état de l'art, est la rareté des écrits sur les systèmes hybrides à énergies renouvelables pour l'irrigation mais surtout sur la gestion d'énergie de ces systèmes. À notre connaissance, il y a très peu d'articles scientifiques sur la gestion d'énergie des systèmes autonomes hybrides à énergies

renouvelables pour l'irrigation. Par conséquent, nous concentrerons notre effort sur la gestion de système hybride photovoltaïque-éolien pour les applications d'irrigation.

## I.2. Evaluation des énergies renouvelables en Algérie

Le potentiel des énergies renouvelables en Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays [5]. Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics, le marché local doit atteindre 600 MW en 2015, amenant la part de l'électricité produite par les énergies renouvelables à 6% de l'électricité totale produite.

**Tableau I.1** : Répartition de la puissance installé [5]

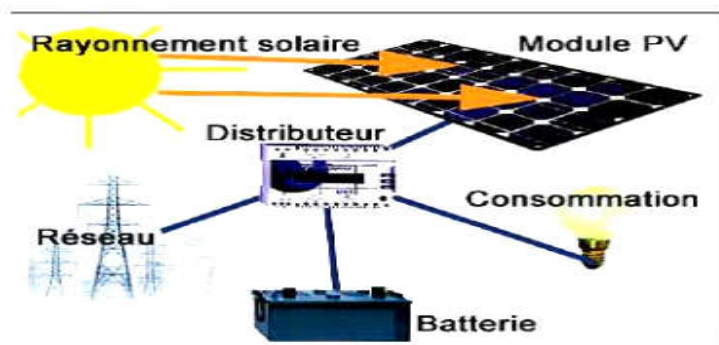
Application	Puissance installée (KW)	Pourcentage
Electrification	1353	58%
Télécommunication	498	21%
Pompage	288	12%
Eclairage public	48	2%
Autres	166	7%

## I.3. Energie solaire photovoltaïque

### I.3.1. Définition

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots : « Phos » signifie lumière et « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745- 1827, inventeur de la pile électrique).

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui produit de l'électricité par la transformation du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque. Plusieurs de ces cellules sont reliées entre-elles sur un panneau photovoltaïque. L'ensemble de panneaux photovoltaïques interconnectés forme un générateur photovoltaïque. Celui-ci convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations [6].



**Figure I.1** : Système Photovoltaïque [6]

### I.3.2. Effet photovoltaïque

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation (I.1) [7] :

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

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

## I.4. Électricité solaire par effet photovoltaïque

### I.4.1. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie obtenue par la conversion de la lumière en électricité. Cette énergie est obtenue grâce au phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. Rapporté par Edmond Becquerel en 1839, le principe est assez simple et consiste en l'émergence d'une différence de potentiel aux extrémités d'une structure de matériel semi-conducteur, produit par l'absorption de la lumière.

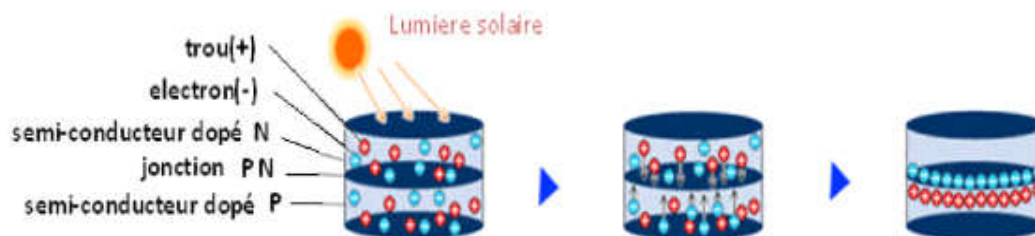


Figure I.2: Schéma synthétique de l'effet photovoltaïque

Plus précisément, comme le montre la figure (I.2), l'effet Photovoltaïque est propre à la cellule (unité fondamentale de conversion). Dans le cas des panneaux photovoltaïques, les cellules sont réalisées à partir de deux couches de silicium, une dopée P (en général dopée au bore) et l'autre dopée N (en général dopée au phosphore). Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension ainsi générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau

utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [8]

#### I.4.2. Les différent types de cellules photovoltaïques [9]

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules:

##### I.4.2.1. Les cellules monocristallines

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

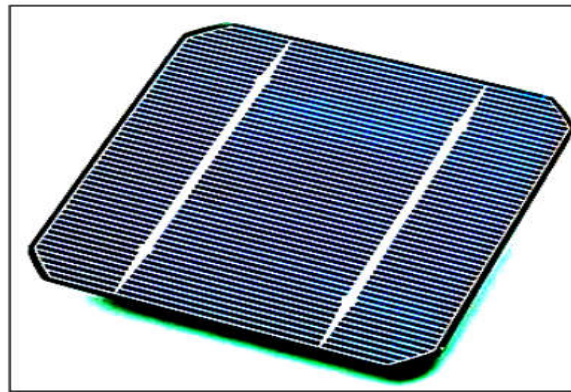


Figure I.3: Cellule photovoltaïque (monocristalline).[9]

##### I.4.2.2. Les cellules polycristallines

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible (11% -13%).

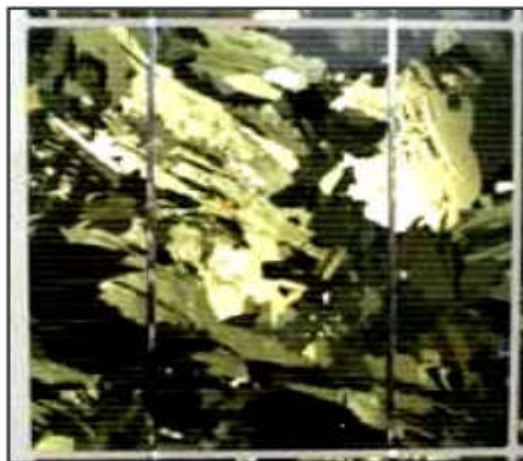


Figure I.4 : Cellule PV polycristalline. Source: Wikipédia

I.4.2.3. Les cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (8%-10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires

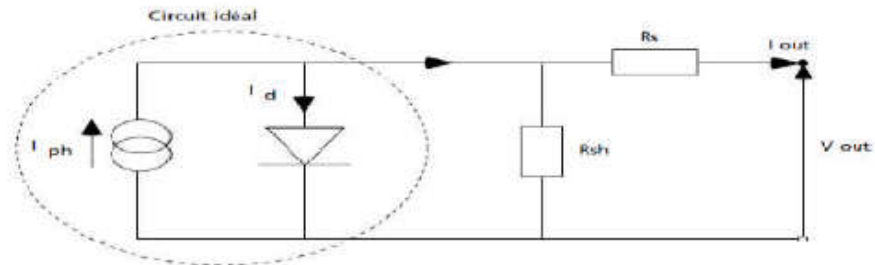
Tableau I.2 : Comparatif des différentes technologies. [9]

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
<b>Silicium monocristallin</b>	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Très performant</li> <li>* Stabilité de production.</li> <li>* Méthode de production coûteuse et laborieuse.</li> </ul>	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
<b>Silicium polycristallin</b>	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Adapté à la production à grande échelle.</li> <li>* Stabilité de production, Plus de 50% du marché mondial.</li> </ul>	Modules pour toits, façades, générateurs...
<b>Amorphe</b>	5 à 8% (13% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> <li>* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente.</li> <li>* Fonctionnement si faible luminosité.</li> <li>* Fonctionnement par temps couvert.</li> <li>* Fonctionnement si ombrage partiel</li> <li>* La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.</li> </ul>	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment



### I.4.3. Schématisation simplifiée d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est représentée comme un générateur de courant qui a une résistance montée en série et une résistance de shuntée qui est montée en parallèle par rapport à une diode et ce générateur Voir la figure ci-dessous:



**Figure I.5 :** Schéma d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.5) représente la photopile idéalisée. Une photopile comporte en réalité une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance en dérivation ou shunt ( $R_{sh}$ ). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique de la photopile :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [10]

### I.4.4. Association des cellules photovoltaïques [11]

#### I.4.4.1. Association en série

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

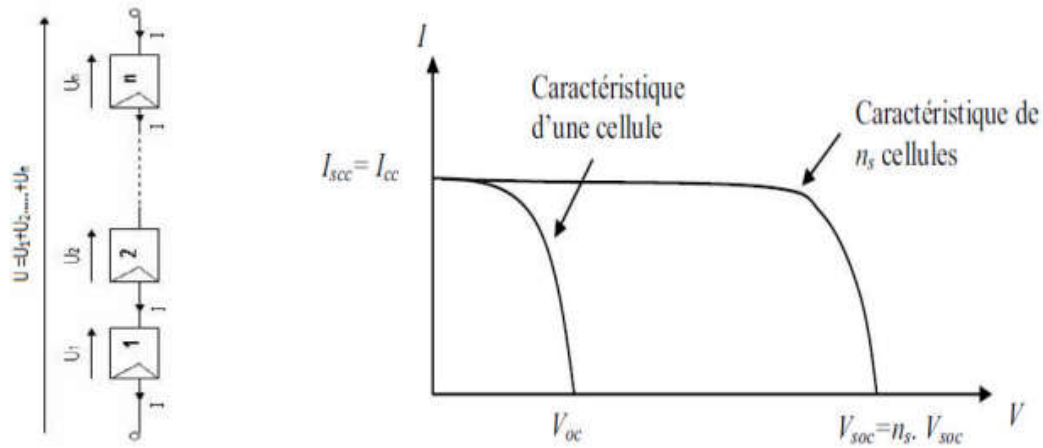


Figure I.6 : Cellules ou modules photovoltaïques en série [11]

I.4.4.2. Association en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

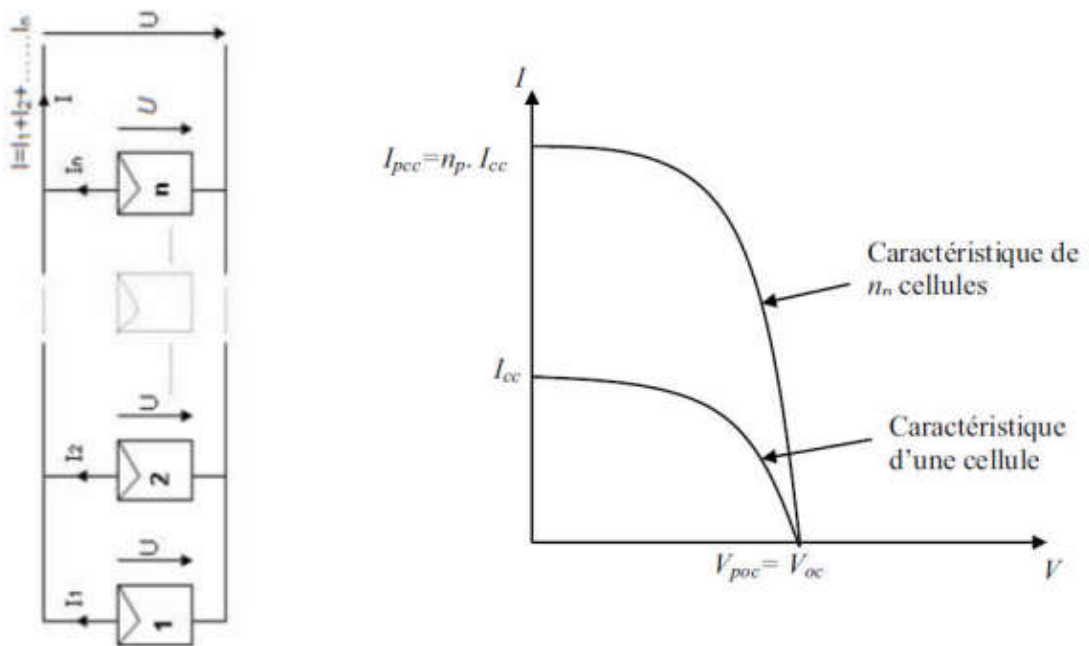


Figure I.7: Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle. [11]

### I.4.4.3. Association mixte (en série et en parallèle)

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former un générateur photovoltaïque

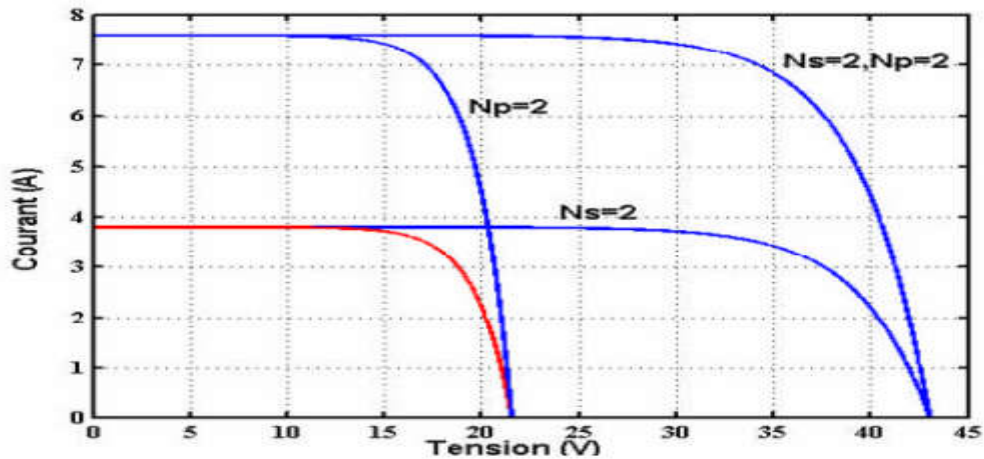


Figure I.8 : Schéma de connexion des cellules solaires en série et parallèle

### I.4.5. Systèmes photovoltaïques

Bien qu'il existe une grande variété de systèmes photovoltaïques, on peut cependant les classer selon leurs connexions au réseau de distribution de l'électricité conventionnel : les systèmes autonomes et les systèmes connectés au réseau de distribution électrique. [12]

#### I.4.5.1. 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.

- **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.

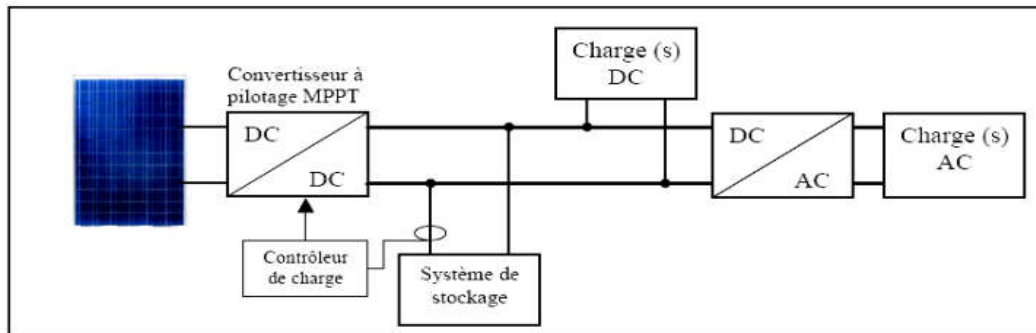


Figure I.9: Installation photovoltaïque autonome. [12]

- **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.4.5.2. 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 [12].

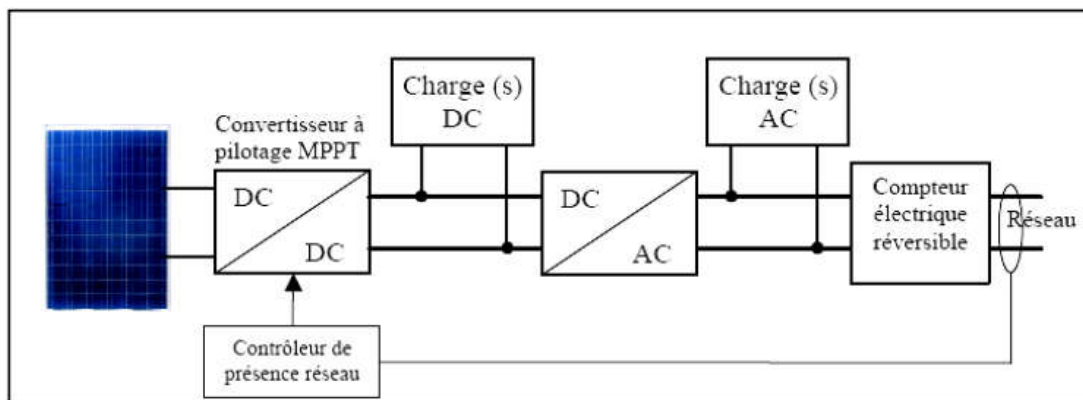


Figure I.10 : Installation photovoltaïque couplée au réseau. [12]

### I.4.6. Avantages et inconvénients des générateurs photovoltaïques

#### I.4.6.1. 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 [13].

### I.4.6.2. 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 [13].

## I.5. Energie éolienne

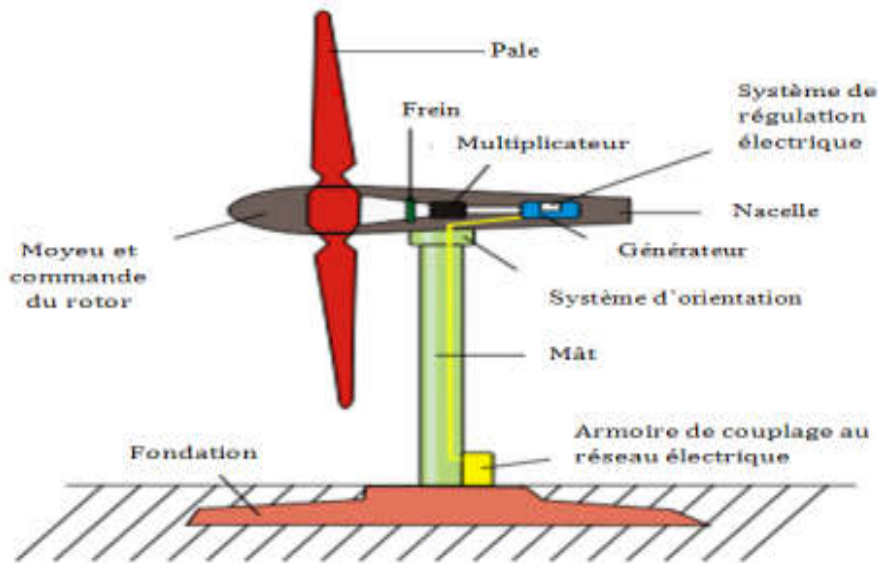
### I.5.1. Définition

L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présentée dans le vent et la transformée en énergie mécanique de rotation, Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- Soit 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 avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

### I.5.2. Constitution d'une éolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie produite à partir du vent, qui exerce sa force sur les pales d'une hélice. Celle-ci est reliée à un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.



**Figure I.11** : Eléments constituant une éolienne [14]

Une éolienne est constituée essentiellement :

- Un mât : son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, pour lui permettre de tourner à une vitesse importante.
- Un rotor : il est composé de plusieurs pales (en général trois) et du moyeu de l'éolienne. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes de pompage) ou plus généralement à un générateur électrique.
- Une nacelle : montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine.
- Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite [14].

### I.5.3. Différents types d'aérogénérateurs

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

### I.5.3.1. 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 [15].

- **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.12). 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.



**Figure I.12** : Eolienne à axe vertical la Savonius [15]

- **Darrius**

Du nom de l'ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30. Ce type du rotor est généralement sous forme parabolique comme montré sur la figure (I.13). 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.



**Figure I.13** : Eolienne à axe vertical la Darrieus [15].

### **I.5.3.2. Eoliennes à axe horizontal**

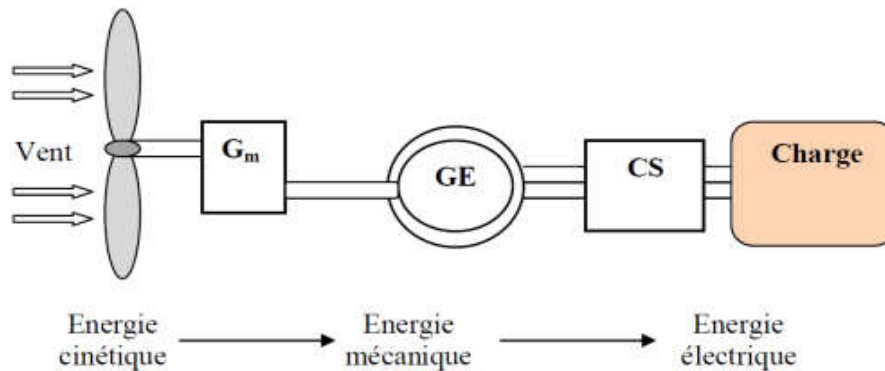
Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent comme montré sur la figure (I.14). Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie son efficacité.



**Figure I.14** : Eolienne à axe horizontal [15].



### I.5.4. Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur



**Figure I.15** : Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [16].

Avec :

$G_m$  : 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.15) :

- 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
- 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 [16].

### I.5.5. Avantages et inconvénients des générateurs éoliens

#### I.5.5.1. 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  $CO_2$ .
- 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].

### I.5.5.2. 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.6. Système d'énergie hybride (S.E.H)

### I.6.1. Définition :

Un système hybride est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergies : une ou plusieurs sources de production d'énergie classique (groupe diesel en général) et au moins une source de production d'énergies renouvelables. Le système hybride peut comprendre aussi un dispositif de stockage.

### I.6.2. Etat de l'art des systèmes électriques hybrides SEH

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.

Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures, celles-ci sont résumées dans la figure (I.16). 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. [18]

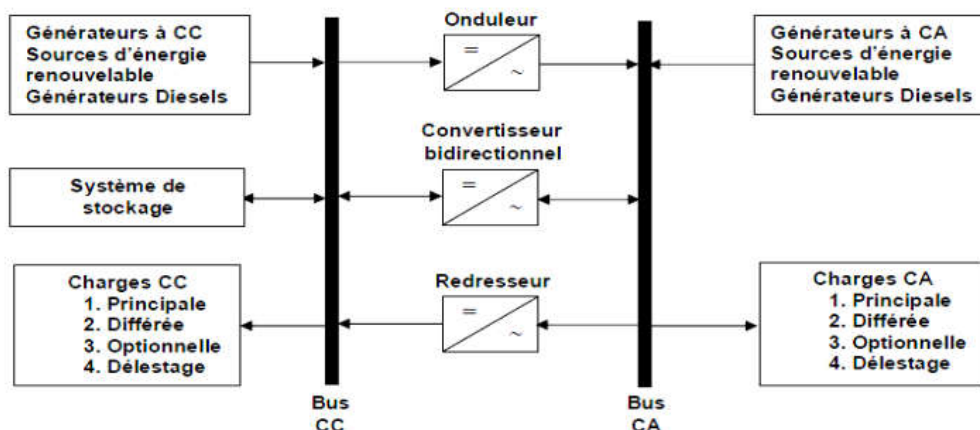


Figure I.16: Architecture des systèmes hybrides d'énergie [18].

### I.6.3. 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 [18]

#### I.6.3.1. Architecture à bus continu CC

Dans le système hybride présenté dans la figure (I.17), 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

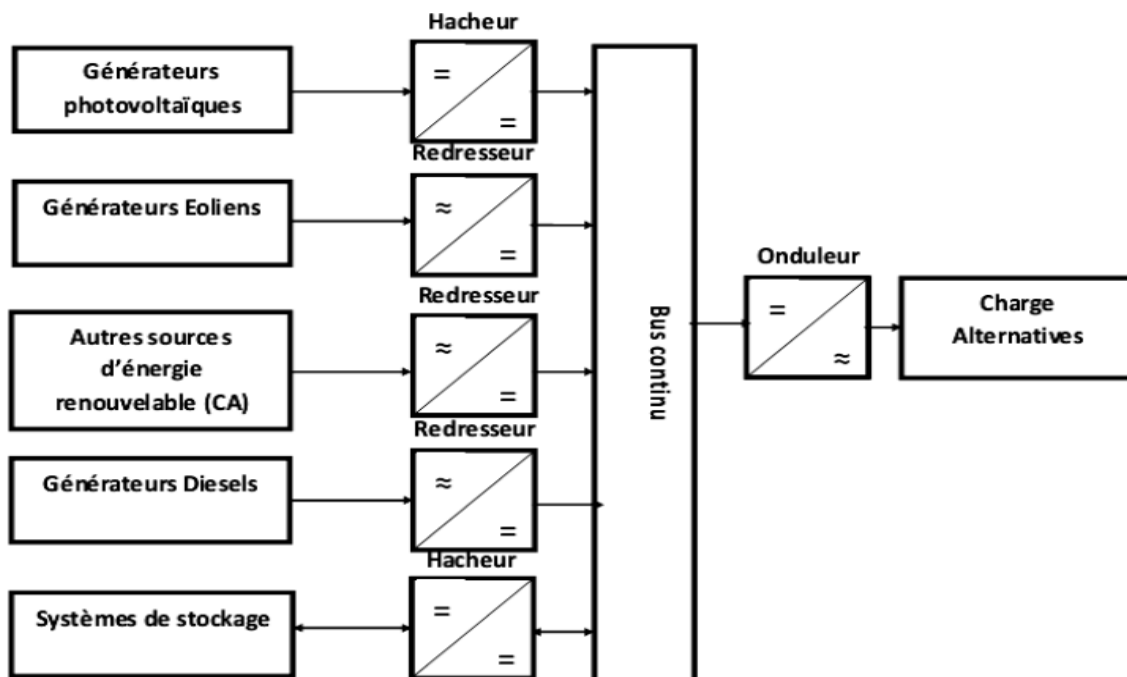


Figure I.17: configuration du système hybride à bus continu [18].

#### I.6.3.2. 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.18). 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 [18].

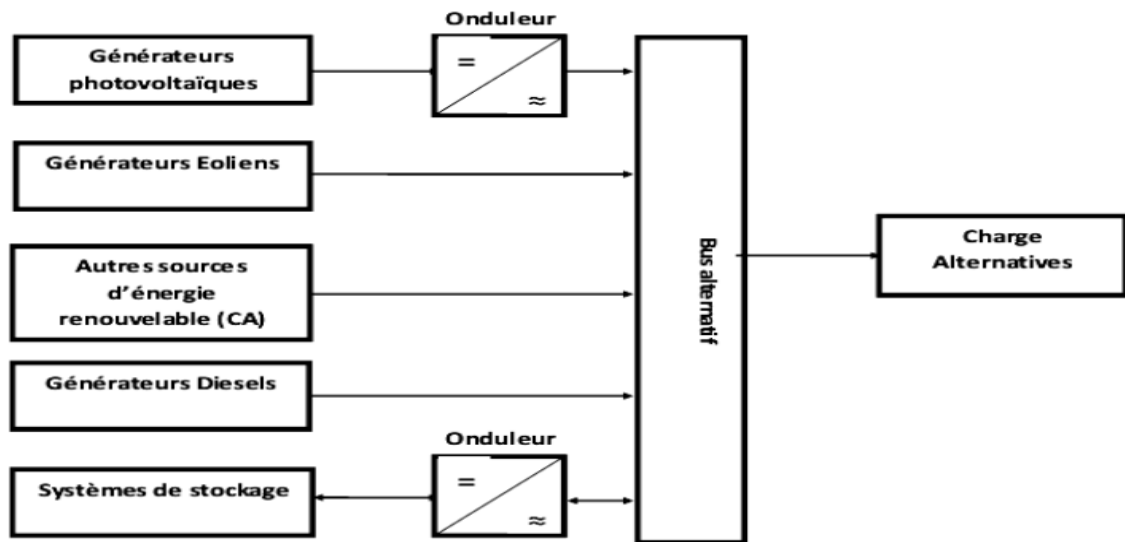


Figure I.18: configuration du système hybride à bus alternatif [18].

### I.6.4. Gamme de la puissance

La puissance délivrée par les SEH peut varier de quelques watts jusqu'à quelques mégawatts. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de faible puissance (< 5 kW) généralement alimentent des petites maisons. Par contre, les systèmes plus grands (puissance > 500 kW) sont conçus pour être connectés à de grands réseaux. Le champ d'application des SEH reste très large.

Néanmoins, on peut réaliser une classification selon la gamme de puissance présentée au tableau(I.3).

Tableau I.3. Classification des SEH par gamme de puissance [19].

Gamme de puissance	Utilisation
<b>Faible</b> : inférieur à 5 kW	• Système autonome : petite maison, pompage d'eau
<b>Moyenne</b> : entre 10 à 250 kW	• Alimentation d'un village isolé, des zones rurales...
<b>Grande</b> : supérieure à 500 kW	• Grands réseaux isolés.

### I.6.5. Le choix de la chaîne de conversion d'énergie

En fonction de l'application et des sources d'énergies disponibles en Algérie, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelables que conventionnelles. On rappelle que nous avons donné un aperçu des possibilités des énergies

renouvelables, en nous focalisant davantage sur les filières éolienne et photovoltaïque et cela vu le potentiel important et les complémentarités entre les deux sources choisies, et cela dû à la grande surface et la diversité des paysages dont notre pays dispose.

### I.6.6. Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien

Dans notre cas précis, on s'intéresse aux systèmes de petites puissances qui regroupent deux parties à savoir l'éolienne et les panneaux solaires. Ces deux sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique (Figure I.20), et produisent du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur autonome dans le circuit [20]. En couplant ces systèmes et en les associant à un dispositif de stockage de l'énergie, nous aurons alors les avantages suivants :

- Exploitation du système sans interruption;
- Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système;
- Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques.

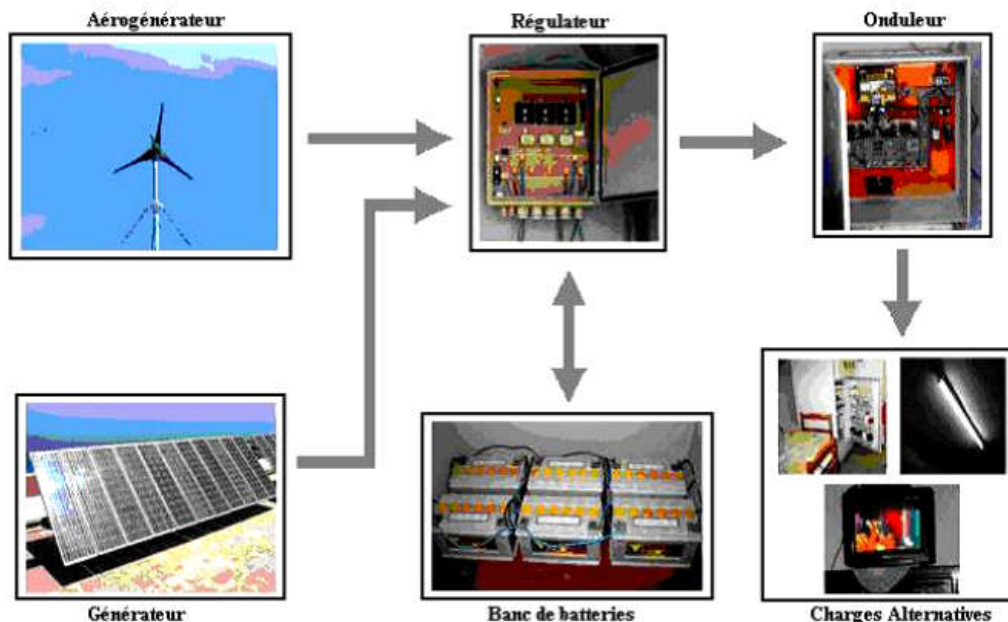


Figure I.19 : Schéma synoptique du système hybride étudié.

### I.6.7. Principaux composants du Système d'énergie hybride photovoltaïque -éolien

Les systèmes hybrides photovoltaïque-éolien comprennent généralement :

- un système générateur ;
- un système de régulation ;
- un système de stockage ;
- des équipements de puissance ;
- une charge.

Le système générateur est composé par les modules photovoltaïques et les aérogénérateurs. Il est indispensable que les deux fonctionnent à la même tension nominale 12 ou 24 V et en

courant continu.

La régulation doit tenir compte du fait qu'il s'agit de deux courants de nature différents :

- Le photovoltaïque assez constant et d'un seuil bas ,
- L'éolien, très variable.

Le système de régulation se chargera donc de faire fonctionner le système générateur en un point optimal pour la charge des batteries.

## I.6.8. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien

### I.6.8.1. Générateurs photovoltaïques

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base par des cellules photovoltaïques. Elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire. Elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit. La cellule photovoltaïque est donc un moyen sûr et écologique de produire de l'énergie.

#### I.6.8.1.1. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

Le courant délivré sur une charge par une cellule PV éclairée s'écrit [21] :

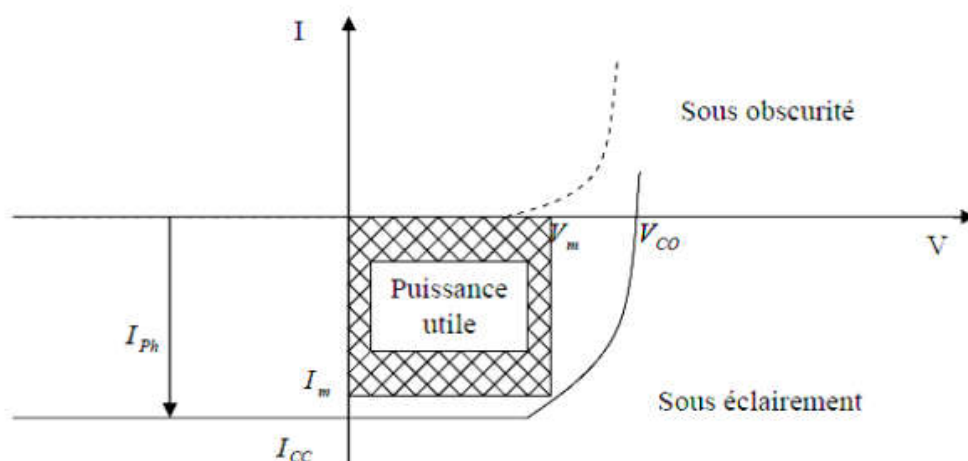
$$I(A) = I_{ph}(A) - I_{obs}(A) \quad (II.2)$$

Avec :

$I_{ph}$  : Densité de courant photogénéré.

$I_{obs}$  : Densité de courant d'obscurité.

Dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant photogénéré et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à la cellule d'une cellule sous éclairage (Figure I.21).



**Figure I.20:** Caractéristiques  $I=f(v)$  sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque [21]

### I.6.8.2. Générateur éolien

Un système éolien ou un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique.

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire [22].

#### I.6.8.2.1. 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.6.8.3. 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. [23].

#### **I.6.8.3.1. 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.

#### **I.6.8.3.2. 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 [23].

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.6.8.3.3. 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.

### **I.6.8.4. 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.6.8.5. Charges**

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

#### **I.6.9. Avantages et inconvénients d'un système hybride**

##### **II.6.9.1. 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 [24].

##### **I.6.9.2. 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 [24].

#### **I.7. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre une description de l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne Ensuite nous avons combiné ces deux énergies pour obtenir un système hybride dans ce but, les sources du S.E.H étudié sont modélisées puis dimensionnées dans le chapitre suivant.

Dans le chapitre suivant, on présentera une étude sur la Modélisation des composants du système hybride.

# *Chapitre II*

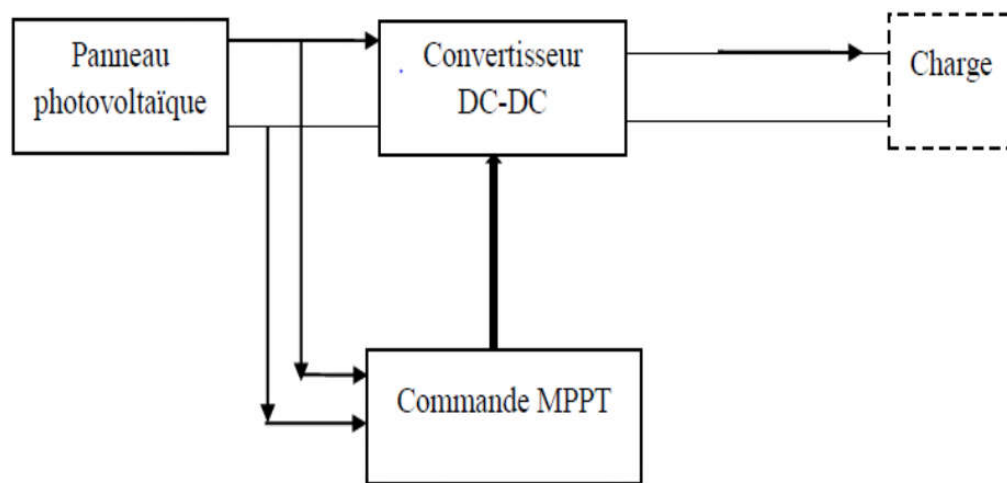
## *Modélisation des composants du système hybride*

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre, 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

Un système photovoltaïque est composé par des panneaux photovoltaïques branchés en série/parallèle, qui jouent le rôle d'un générateur PV, et un convertisseur DC/DC, et un système de commande, ce système alimente une charge (Batteries). Comme présenter sur la figure (II.1)



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

## II.3. Modélisation du panneau photovoltaïque [25]

Nous rencontrons dans la littérature plusieurs modèles de générateur PV, qui diffère entre eux par la procédure et le nombre des paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant final. Parmi tous ces modèles, nous avons utilisé le modèle le plus simple qui est le modèle à une seule diode. Dans ce qui suit nous allons citer les différents modèles existant et nous intéresser particulièrement au modèle à une seule diode.

- **Model idéal**

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à l'éclairement incident, en parallèle avec une diode qui correspond à la jonction P-N de la cellule PV.

- **Modèle à une diode sans résistance parallèle**

La cellule photovoltaïque est composée d'une source de courant modélisant le flux lumineux, d'une diode pour la polarisation de la cellule et une résistance série.

- **Modèle à deux diodes sans résistance parallèle**

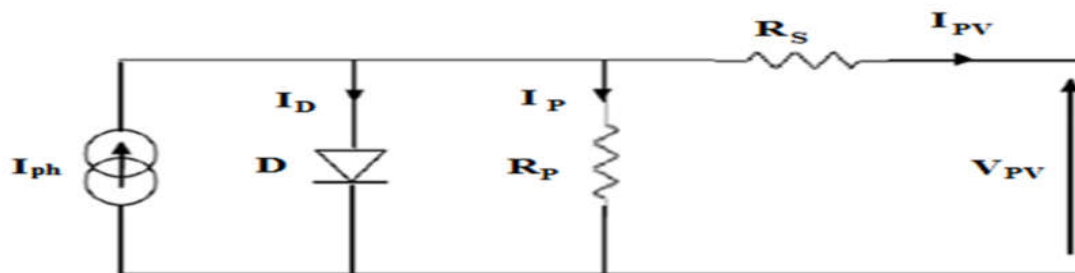
La cellule photovoltaïque est composée d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la polarisation de la cellule et une résistance série.

- **Modèle à deux diodes (à deux exponentielles)**

La cellule photovoltaïque est composée d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance parallèle et une résistance série.

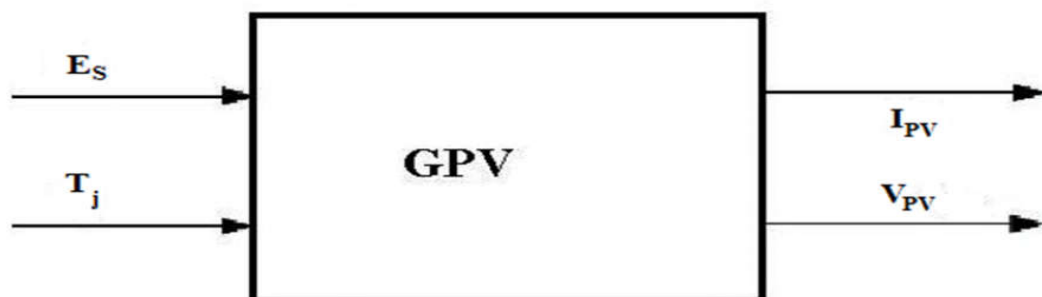
- **Modèle à une diode [26]**

Le modèle à une diode est le modèle le plus classique de la littérature. Il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, deux résistances ( $R_s$ ,  $R_p$ ) pour les pertes, le modèle d'une cellule est celui de la figure ci-dessous (II.2).



**Figure II.2:** Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode.

Ce modèle comporte quatre variables. Les deux variables d'entrée sont :  $E_s$ - ensoleillement dans le plan des modules [ $W/m^2$ ] et  $T_j$ - température de jonction de la cellule [ $^{\circ}C$ ]. Les deux variables de sortie sont :  $I_{PV}$ - courant fourni par le groupe de modules [A] et  $V_{PV}$ -la tension aux bornes du groupe de modules [V].



**Figure II.3:** Schéma bloc du GPV.

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

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_D - I_P \quad (II.1)$$

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

$$I_P = \frac{V_{PV}}{R_P} \quad (II.2)$$

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

$$I_{Ph} = P_1 E_S (1 + P_2 (E_S - E_{Sréf})) + P_3 (T_j - T_{jréf}) \quad (II.3)$$

La température de jonction est donnée par :

$$T_j = T_a + E_S \left( \frac{N_{OCT} - 20}{800} \right) \quad (II.4)$$

Le courant dans la diode est donnée par :

$$I_D = I_0 \left[ \exp \left( \frac{q}{K A n_S T_j} (V_{PV} + R_S I_{PV}) \right) - 1 \right] \quad (II.5)$$

Le courant de saturation dans la diode est donné par :

$$I_0 = P_4 T_j^3 \exp \left( \frac{E_g}{K T_j} \right) \quad (II.6)$$

On obtiendra alors :

$$I_{PV} = P_1 E_S (1 + P_2 (E_S - E_{Sréf})) + P_3 (T_j - T_{jréf}) - P_4 T_j^3 \exp \left( \frac{E_g}{K T_j} \right) * \left[ \exp \left( \frac{q}{K A n_S T_j} (V + R_S I) \right) - 1 \right] - \frac{V}{R_P} \quad (II.7)$$

Où :

$I_{PV}$  : Le courant de cellule.

$V_{PV}$  : 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 [ $^{\circ}C$ ].

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

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

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

$I_0$ : Courant de saturation de la diode [ $\text{A}$ ].

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

$n_s$ : Nombre total de cellules connectées en séries et/ou en parallèles.

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

$E_g$ : Energie de gap.

$N_{OCT}$ : La température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$P_1, P_2, P_3, P_4$  : Paramètres constants.

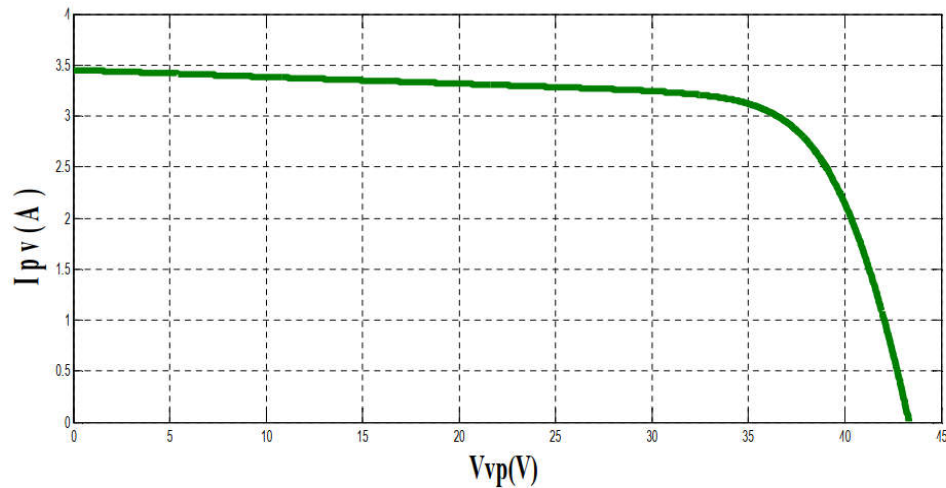
## II.4. Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque

Dans notre travail nous avons utilisé le panneau de type SHARP [175W<sub>c</sub>-24 V].

### II.4.1. Caractéristique Courant-Tension

La courbe caractéristique d'un panneau photovoltaïque représente la variation du courant qu'elle produise en fonction de la tension à ses bornes, depuis le court-circuit (tension nulle correspondante au courant maximal) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de panneau).

La figure (II.4) représente la courbe  $I = f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^{\circ}\text{C}$ .



**Figure II.4:** Caractéristique  $I_{PV} = f(V_{PV})$  d'un module photovoltaïque [27].

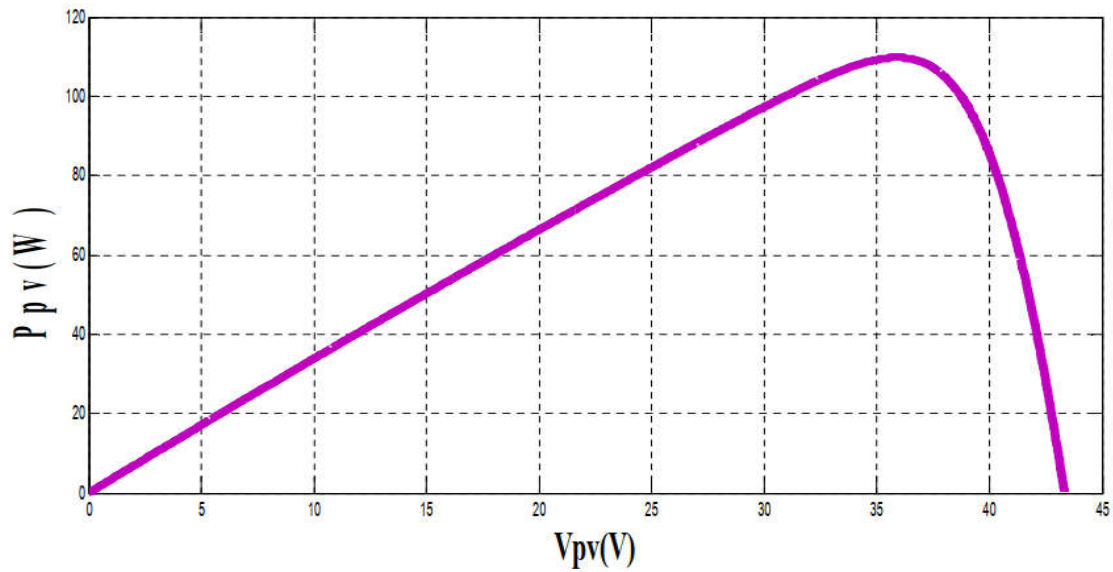
Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance.

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P_{mpp}$  où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée [27].

#### II.4.2. Caractéristique puissance –tension

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement standard (éclairage de  $1000\text{W/m}^2$  température de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) la puissance électrique  $P_{PV}$  disponible aux bornes d'un panneau photovoltaïque est égale au produit du courant photovoltaïque fourni  $I_{PV}$  par la tension à ces bornes donnée  $V_{PV}$ .

Puissance délivrée par le module a pour expression :  $P_{PV} = V_{PV} * I_{PV}$



**Figure II.5:** Courbe  $P_{PV} = f(V_{PV})$  d'un module photovoltaïque[27].

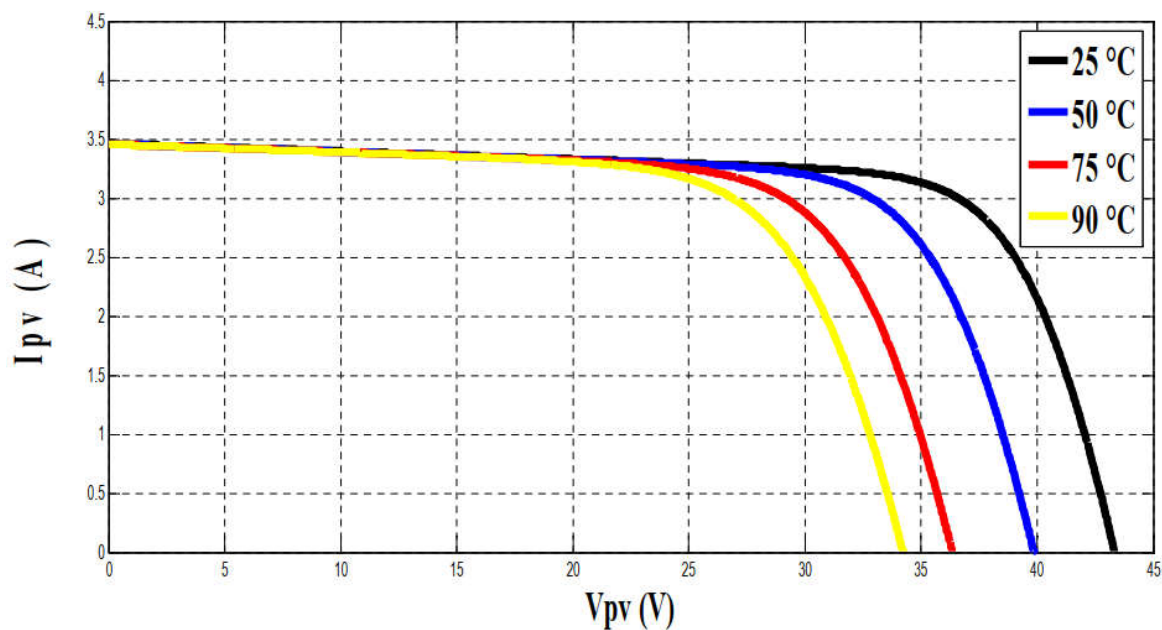
Cette courbe passe par un maximum de puissance ( $P_{opt}$ ), à cette puissance correspond une tension  $V_{opt}$  et un courant  $I_{opt}$  [27].

## II.5. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

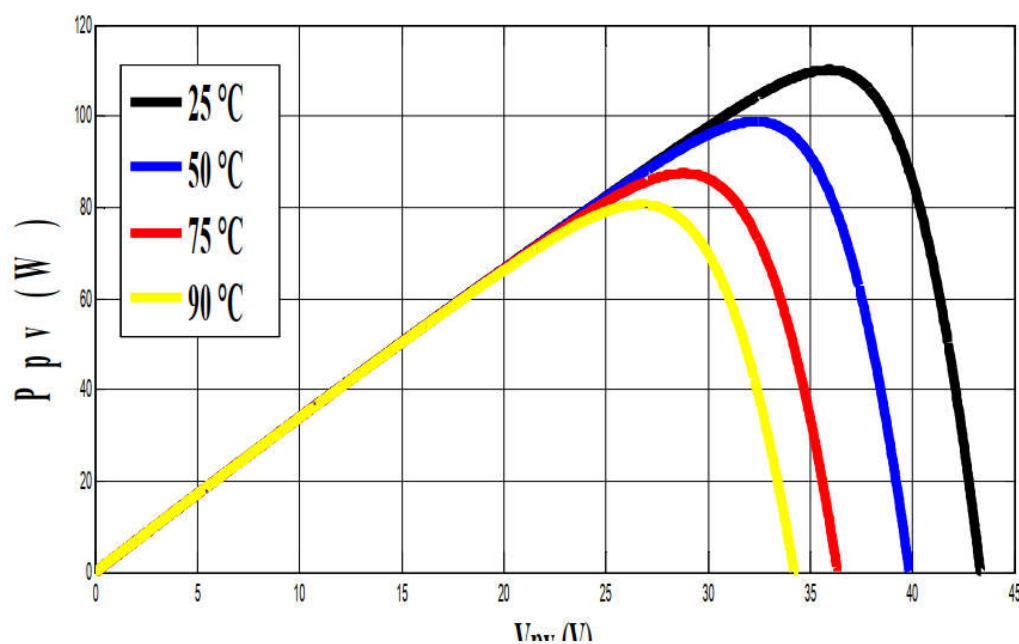
### II.5.1. Influence de la température

Les figures (II.6) et (II.7) présentent respectivement des courbes courant-tension et puissance-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule photovoltaïque (25, 50, 75, et 90°C) :





**Figure II.6:** Caractéristique courant-tension pour différentes températures[27].



**Figure II.7:** Caractéristique puissance-tension pour différentes températures[27].

On constate que la température influe sur la tension de circuit ouvert et non sur le courant de court-circuit de la cellule. Suivant les figures (II.6) et (II.7), on constate que lorsque la température croît à irradiation constante ( $1000\text{W/m}^2$ ) la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  décroît fortement et le courant de court-circuit  $I_{cc}$  augmente légèrement. L'augmentation de la température se traduit au total par une diminution de la puissance maximale disponible.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% par degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C [27].

### II.5.2. Influence de l'intensité du rayonnement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Les figures (II.8) et (II.9) représentent la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV pour une température constante de (25°C) et pour différente intensité rayonnante de (400, 600, 800 et 1000W/m<sup>2</sup>).

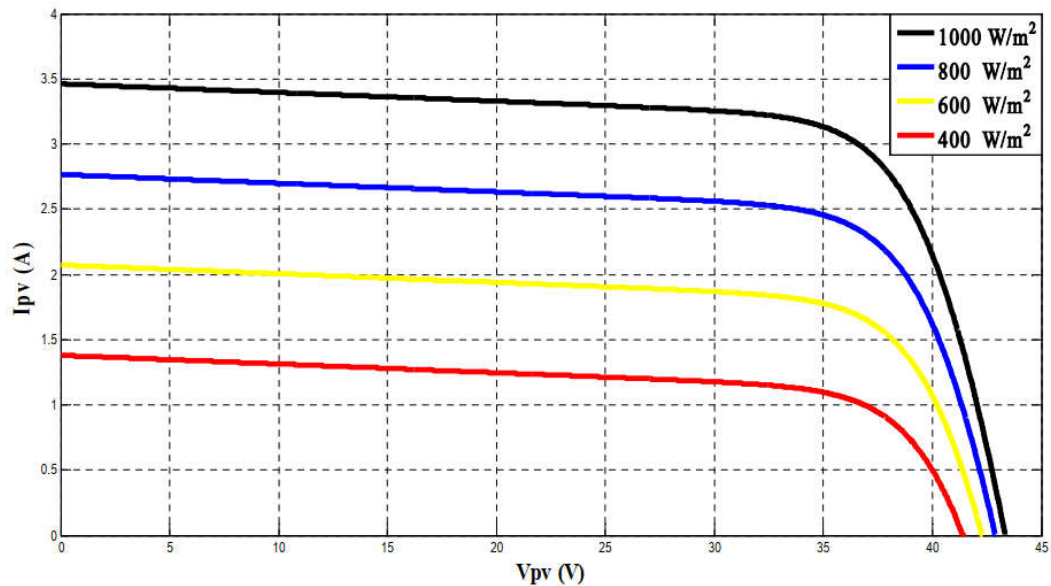


Figure II.8: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I_{PV}=f(V_{PV})$  [27].

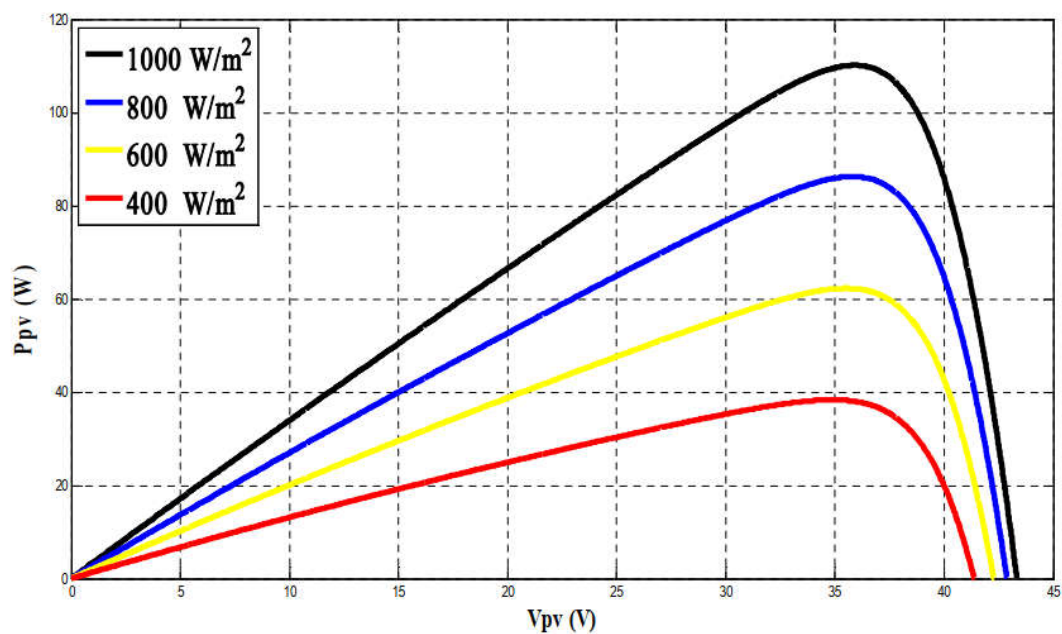


Figure II.9: Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements[27].

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

Et pour la caractéristique puissance-tension l'éclaircissement est proportionnel à la puissance optimal par-contre la tension du circuit ouvert ne varie pas beaucoup et reste quasiment identique.

D'après les résultats de la simulation on peut dire que les performances d'un générateur PV sont fortement influencées par les conditions météorologiques, particulièrement l'ensoleillement et la température. Cela nécessite donc une commande pour extraire le maximum de puissance quelque-soit ces paramètres [27].

### II.6. 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.10). 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.

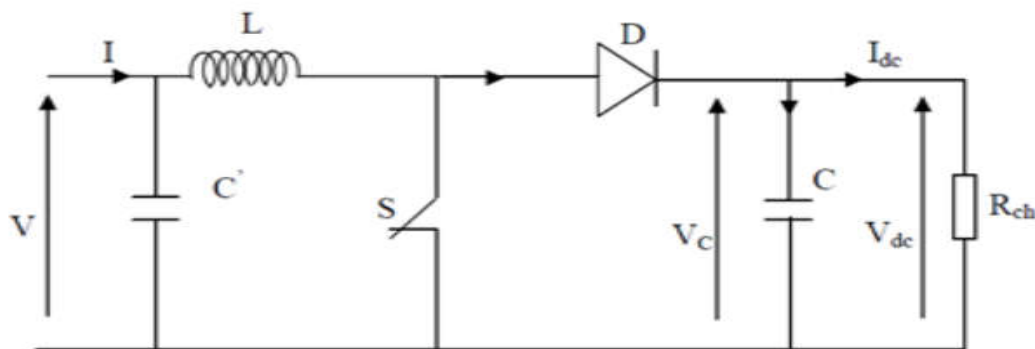


Figure II.10: Circuit électrique du convertisseur DC-DC.

Les figures (II.11), (II.12) 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  $\alpha \cdot T$  ( $\alpha$  rapport cyclique, est compris entre  $0$  et  $1$ ).



Figure II.11: Schéma d'un Hacheur survolteur à  $t \in [0, \alpha \cdot T]$ .

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

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

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

Avec :  $I_c = I_R$

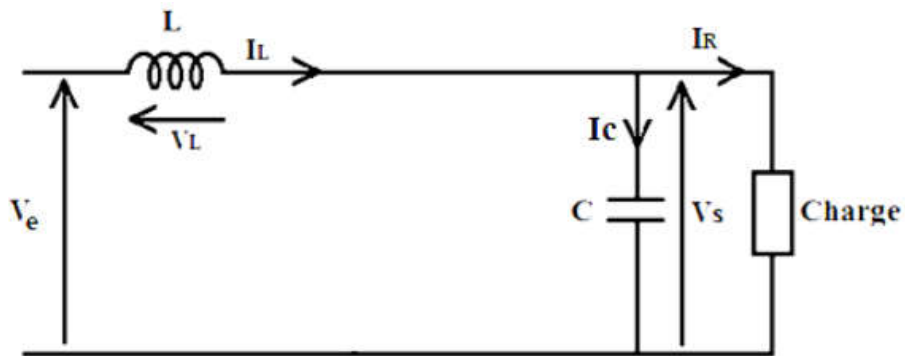


Figure II.12: Schéma d'un Hacheur survolteur à  $t \in [\alpha. T, T]$ .

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

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

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

### II.7. 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.13) :

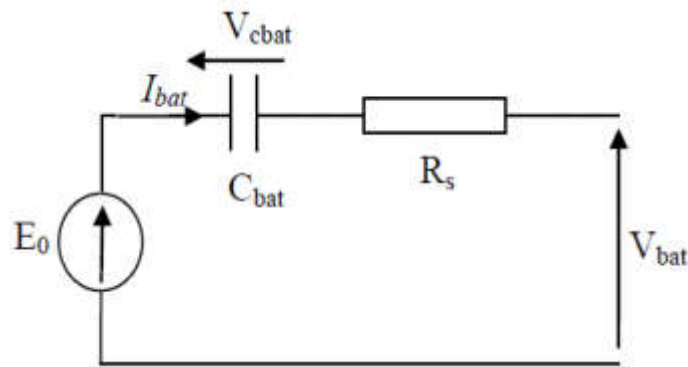


Figure II.13: Modèle R-C de la batterie.

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 :

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

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

Avec :

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

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

### III.8. Modélisation de la chaîne de production éolienne

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pâles, du système mécanique de transmission, et du générateur électrique. Le schéma synoptique étudié dans ce travail est présenté sur la figure (II.14). Il s'agit d'une turbine éolienne, d'une génératrice asynchrone, et d'un convertisseur statique. Ce système alimente une charge autonome par l'intermédiaire d'un dispositif d'interconnexion [28].

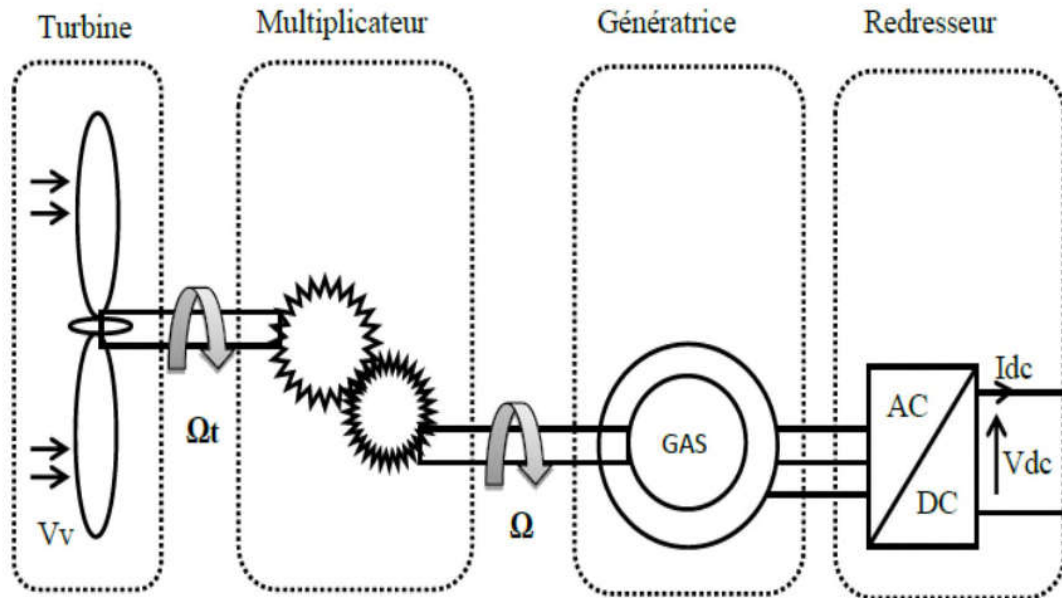


Figure II.14: Schéma synoptique de l'aérogénérateur [28]

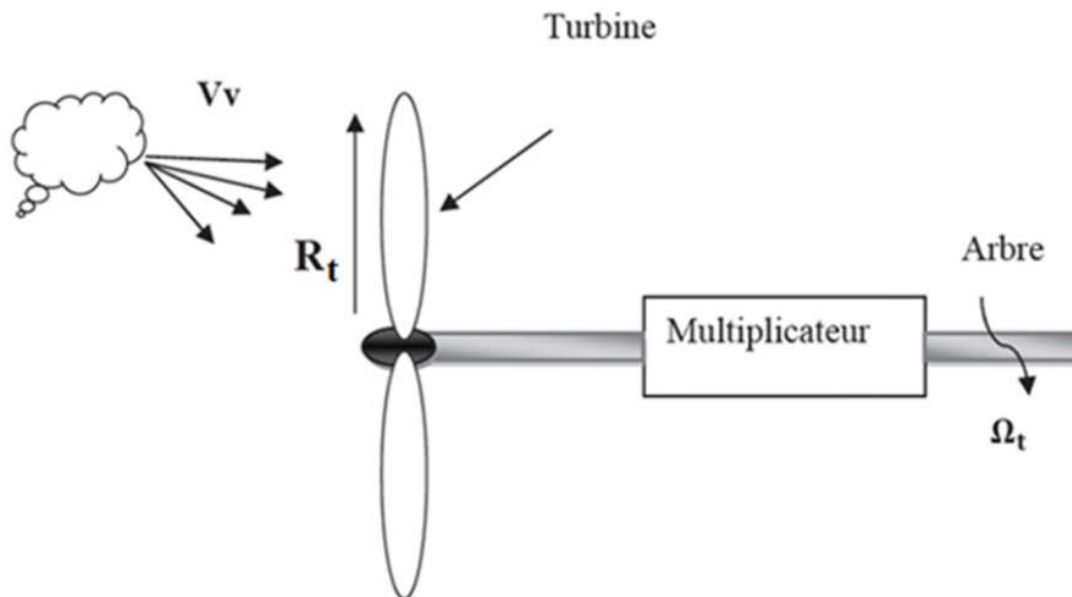
### II.8.1. Modélisation de la vitesse du vent

Le vent est variable dans l'entrée du système éolien. Sa mesure exacte au niveau de moyeu est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. La vitesse du vent est généralement représentée par la fonction suivante:

$$V_v = f(t) \quad (\text{II.15})$$

### II.8.2. Modélisation de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  de la voilure.



**Figure II.15:** Système de la turbine à modéliser [28].

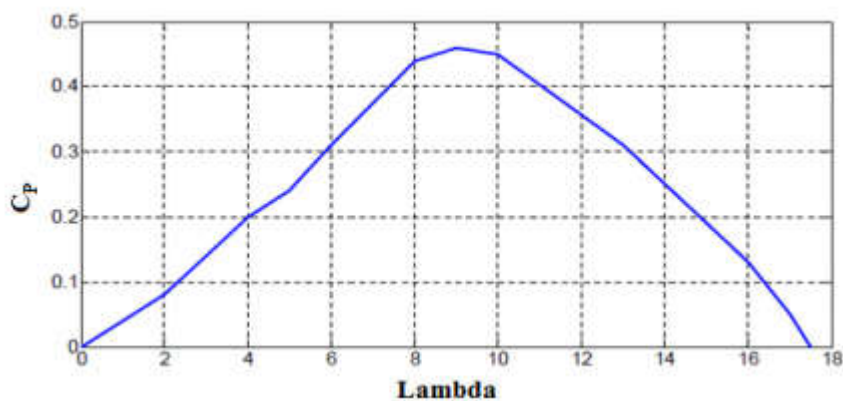
Pour simuler la turbine, on utilise le couple associé à la caractéristique  $C_p(\lambda)$ , le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante:

$$T_t = \frac{1}{2\Omega_t} C_p \rho S V_v^3 \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$S = \pi R_t^2 \quad (\text{II.17})$$

L'expression du coefficient de puissance de la turbine est généralement décrit par un polynôme, issu de l'interpolation des points en provenance des mesures. Le tracé de la turbine choisie est représenté sur la figure (II.16) suivante :



**Figure II.16:** Courbe  $C_p(\lambda)$  [28].

### II.8.3. Modèle des pâles

La puissance cinétique du vent est donnée par

$$P_V = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \quad (\text{II.18})$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique  $T_t$  est donné par l'expression suivante :

$$T_t = \frac{1}{2 \Omega_t} C_P \rho S V_v^3 \quad (\text{II.19})$$

La puissance aérodynamique  $P_t$  apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit :

$$P_t = C_P P_V = \frac{1}{2} C_P \rho S V_v^3 \quad (\text{II.20})$$

$\Omega_t$ : La vitesse de la turbine.

$\rho$ : La densité de l'air.

$S$ : L'aire balayée par la turbine.

$V_v$ : Vitesse du vent.

$C_P$  : Le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend des dimensions de la pale, le ratio de la vitesse ( $\lambda$ ) et l'angle d'orientation de la pale  $\beta$ .

Le ratio de vitesse  $\lambda$  est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine  $\Omega_t$  et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V_v} \quad (\text{II.21})$$

### II.8.4. Le multiplicateur de vitesse

La tâche principale du multiplicateur de vitesse est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice, donc la puissance captée par la turbine est transmise à la génératrice. La vitesse mécanique de la turbine et celle de la génératrice sont liées par la relation suivante :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_m}{G} \quad (\text{II.22})$$

Le couple sur l'arbre lent et celui sur l'arbre rapide sont exprimés par la relation suivante :

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad (\text{II.23})$$



Avec :

$G$ : Le gain du multiplicateur.

$T_{em}$  : Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone [N.m].

$T_t$  : Le couple développé par la turbine sous l'action du vent [N.m].

$\Omega_m$ : La vitesse mécanique de la génératrice [rad/s].

$\Omega_t$  : La vitesse de la turbine [rad/s].

### II.8.5. Equation dynamique de l'arbre de transmission

Avec la présence du multiplicateur, l'équation dynamique de l'arbre est donnée par:

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} + F\Omega_m = T_{em} - T_t \quad (\text{II.24})$$

Avec :

$J$  : Inertie totale de l'arbre de transmission.

$F$  : Le coefficient de frottement dynamique.

### 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.

- . 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 :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

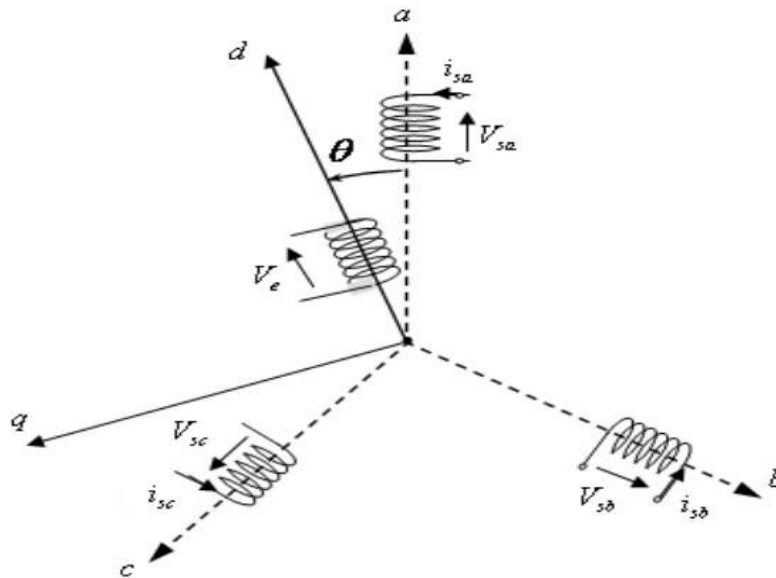
Avec :

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

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

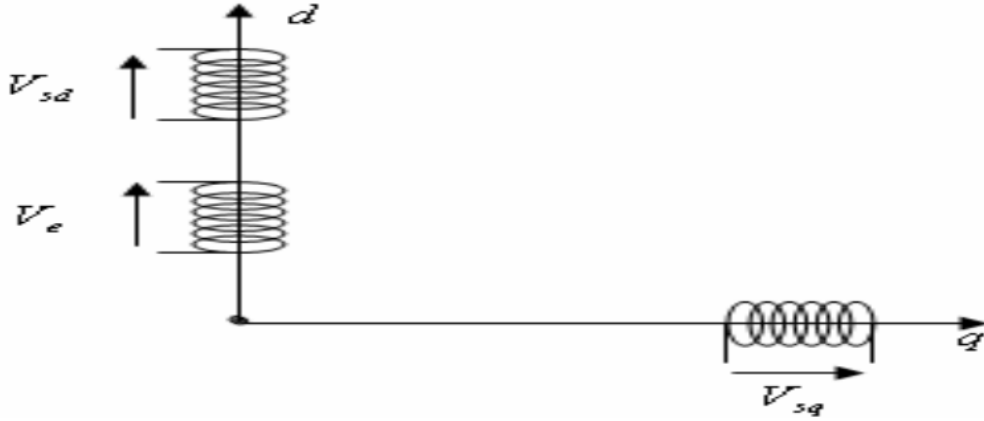
$R_s$ : La résistance des phases statoriques.

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



**Figure II.17:** 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  $Vsd, Vsq$  et  $Isq$ . Le repère de Park est en fait un repère diphasé, similaire au repère triphasé, plus simple à manipuler comme montré sur la figure (II.17), (II.18). On peut passer d'un repère à un autre à l'aide de la matrice de passage.



**Figure II.18:** Développement des enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe ( $dq$ ).

$$[V_{sdq}] = [P(\theta)][i_{sabc}] \quad (\text{II.26})$$

Avec :

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

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

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.

$$\text{Tel que : } i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (\text{II.28})$$

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 :

$$[P_2(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Et sa matrice inverse est donnée par :

$$[P_2(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

On a :

$$[V_{sdq}]^t = [P_2(\theta)][V_S]^t \quad (\text{II.31})$$

$$[i_{sdq}]^t = [P_2(\theta)]^{-1}[i_S]^t \quad (\text{II.32})$$

Tel que :

$$[V_{sdq}]^t = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix}, [i_{sdq}]^t = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \text{ et } [V_S]^t = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, [i_S]^t = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Après simplification, on aura :

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

Avec :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_{sd} I_{sd} + \varphi_f \\ \varphi_{sq} = L_{sq} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

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

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

$L_S$  : Inductance cyclique statorique [H].

$R_S$  : Résistance statorique [ohms].

$\varphi_f$  : Flux inducteur crée par les aimants permanents.

Sachant que pour la machine synchrone, on a :  $W_r = W$ , et en remplaçant l'équation (II.35)

dans (II.34), on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_S I_{sd} + L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} - L_{sq} I_{sq} W \\ V_{sq} = R_S I_{sq} + L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} - L_{sd} I_{sd} W + \varphi_f W \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

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

$$C_e = P[\varphi_{sd} * I_{sq} - \varphi_{sq} * I_{sd}] \quad (\text{II.37})$$

Après simplification, on aura :

$$C_e = P \left( (L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} + \varphi_f \right) I_{sq} \quad (\text{II.38})$$

### II.10. Le redresseur PD3 à diode [29]

$$V_{redmoy} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$V_{dc}$  : La tension redressée [V].

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

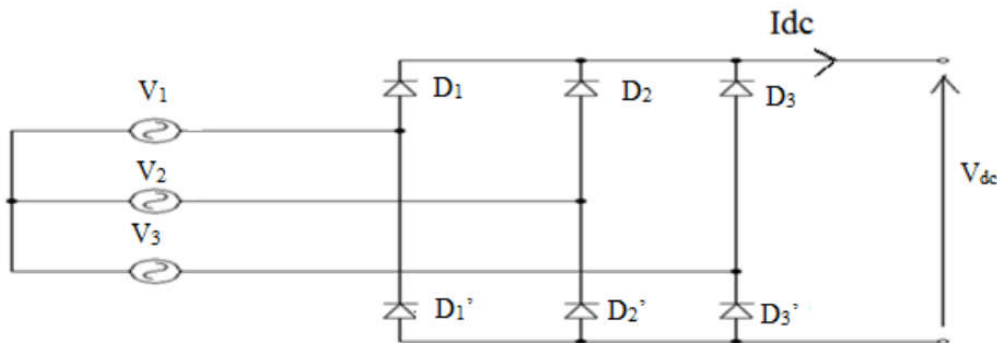


Figure II.19: Le redresseur PD3 à diode

Lorsque D1 conduit l'une des deux diodes D2' et D3' conduit également; il en vient que D1 conduit lorsque  $V_1$  est supérieur à  $V_2$  et  $V_3$ .

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

$$V_{dc} = \max(V_j) - \min(V_j), \quad j=1, 2, 3. \quad (\text{II.40})$$

### II.11. Bus Continu

Le bus continu de la figure (II.20) est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de la tension.

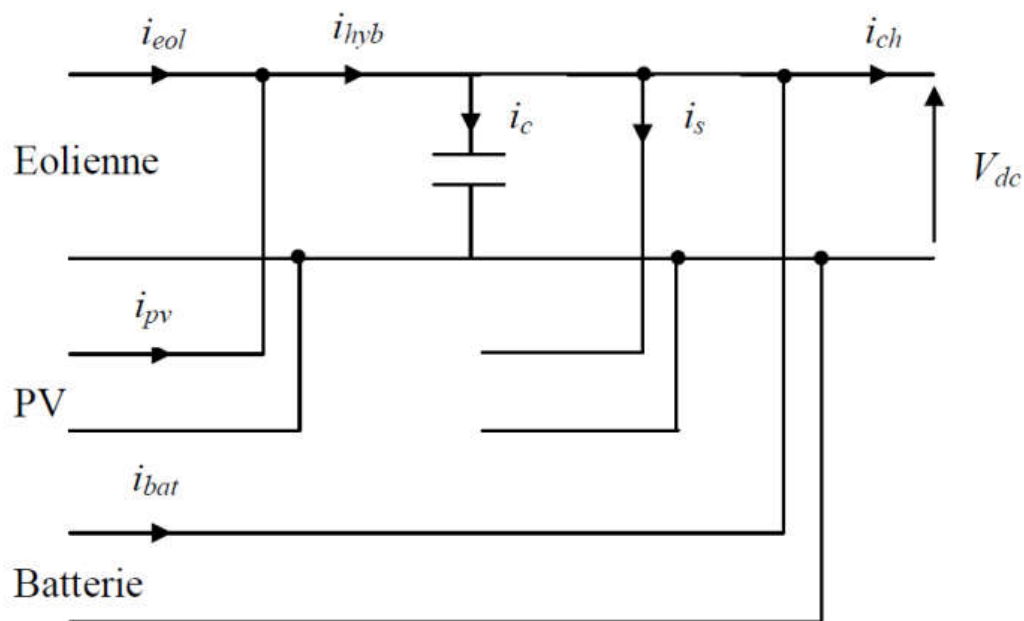


Figure II.20: Schéma d'un bus continu.

D'après la figure (II.20), on a :

$$i_{hyb} = i_{eol} + i_{pv} \quad (\text{II.41})$$

$$i_{ch} = i_{hyb} - i_c - i_s \pm i_{bat} \quad (\text{II.42})$$

Avec :

$$i_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{II.43})$$

Donc la tension du bus continu est égale :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} * i_c dt \quad (\text{II.44})$$

$i_{pv}$ : 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. Dans le chapitre suivant, on présentera une étude sur la simulation et leurre performance du système hybride.

# *Chapitre III*

## *Evaluation du système hybride (éolien-photovoltaïque) avec batteries*

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons simulé le système de l'évaluation d'un système hybride éolien photovoltaïque avec batteries, nous avons opté pour l'utilisation d'un modèle dynamique sous l'environnement Matlab/Simulink.

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

La figure (III.1), présente le schéma bloc du système photovoltaïque avec stockage sous Matlab/Simulink

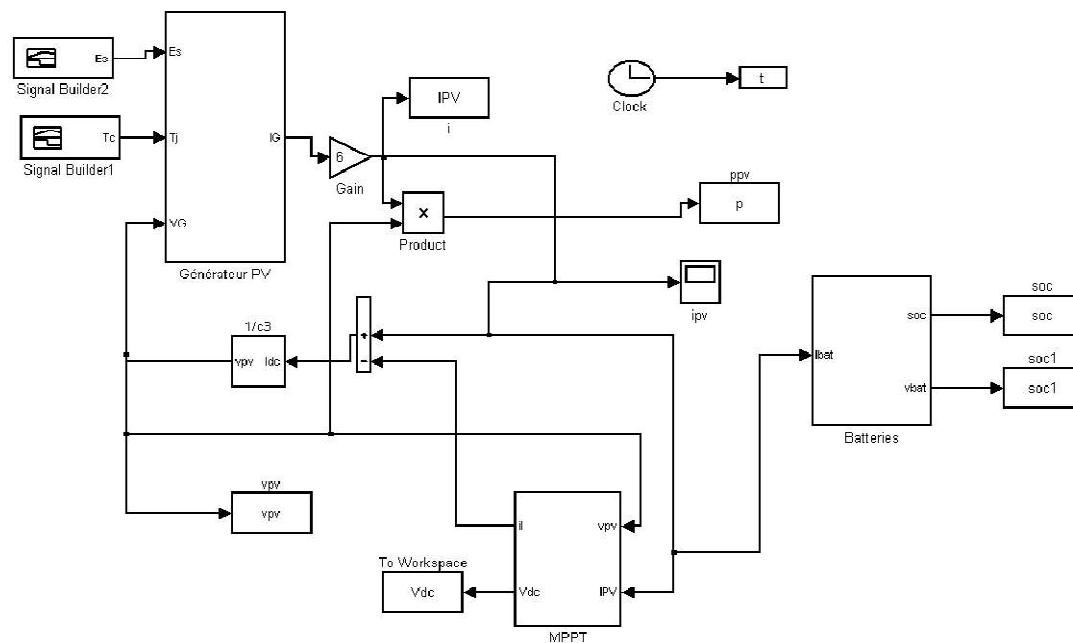


Figure III.1: Schéma Bloc du système photovoltaïque.

#### III.2.1. Résultats de la simulation

A partir de schéma Bloc du système photovoltaïque sous Matlab et exécution de la figure (III.1), on a obtenus ces résultat pour un ensoleillement  $E_s = 600W/m^2$  et une température de  $T_c = 25^\circ C$ .



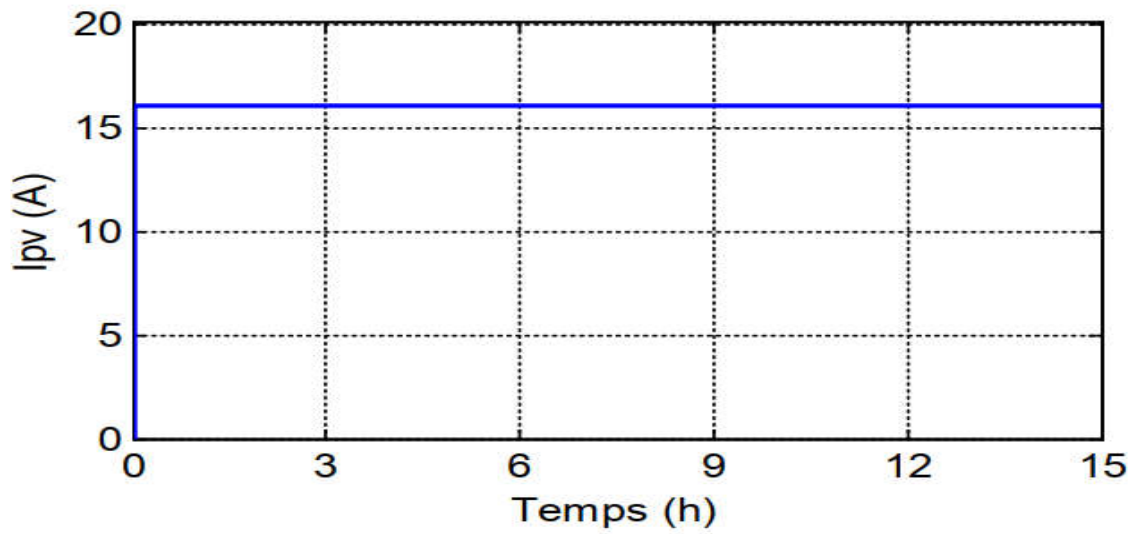


Figure III.2: la courbe du courant photovoltaïque.

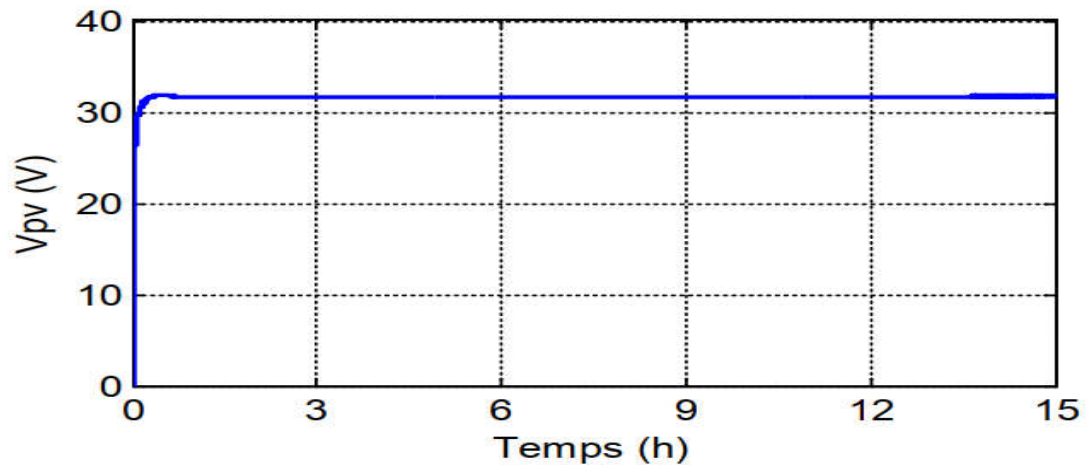
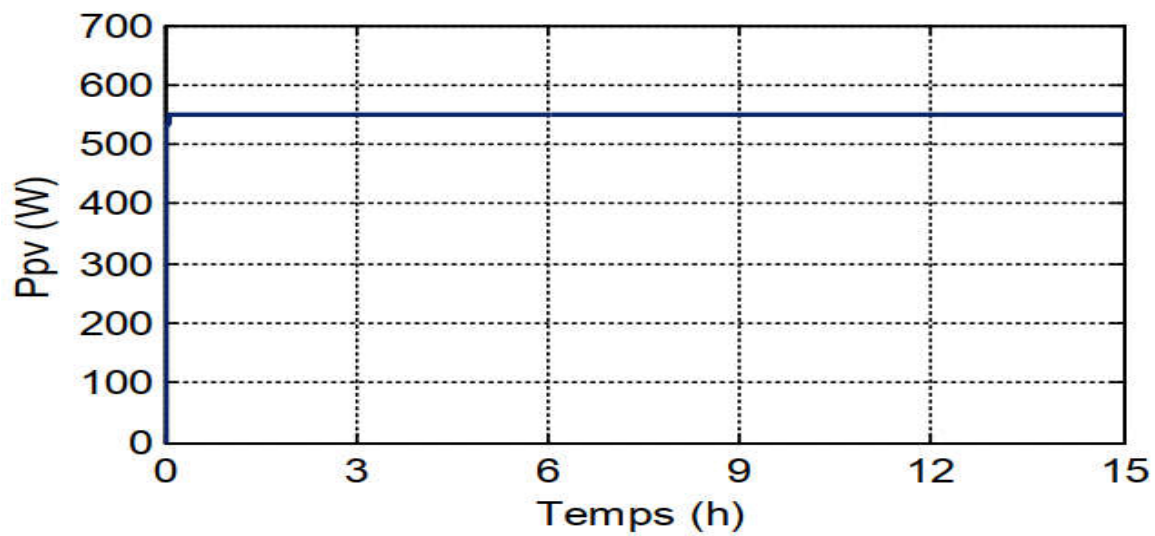


Figure III.3: la courbe de la tension photovoltaïque.



**Figure III.4:** la courbe de la puissance photovoltaïque.

#### Interprétation des résultats :

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

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

La figure (III.5) présente le schéma bloc du système éolien avec stockage sous Matlab/Simulink

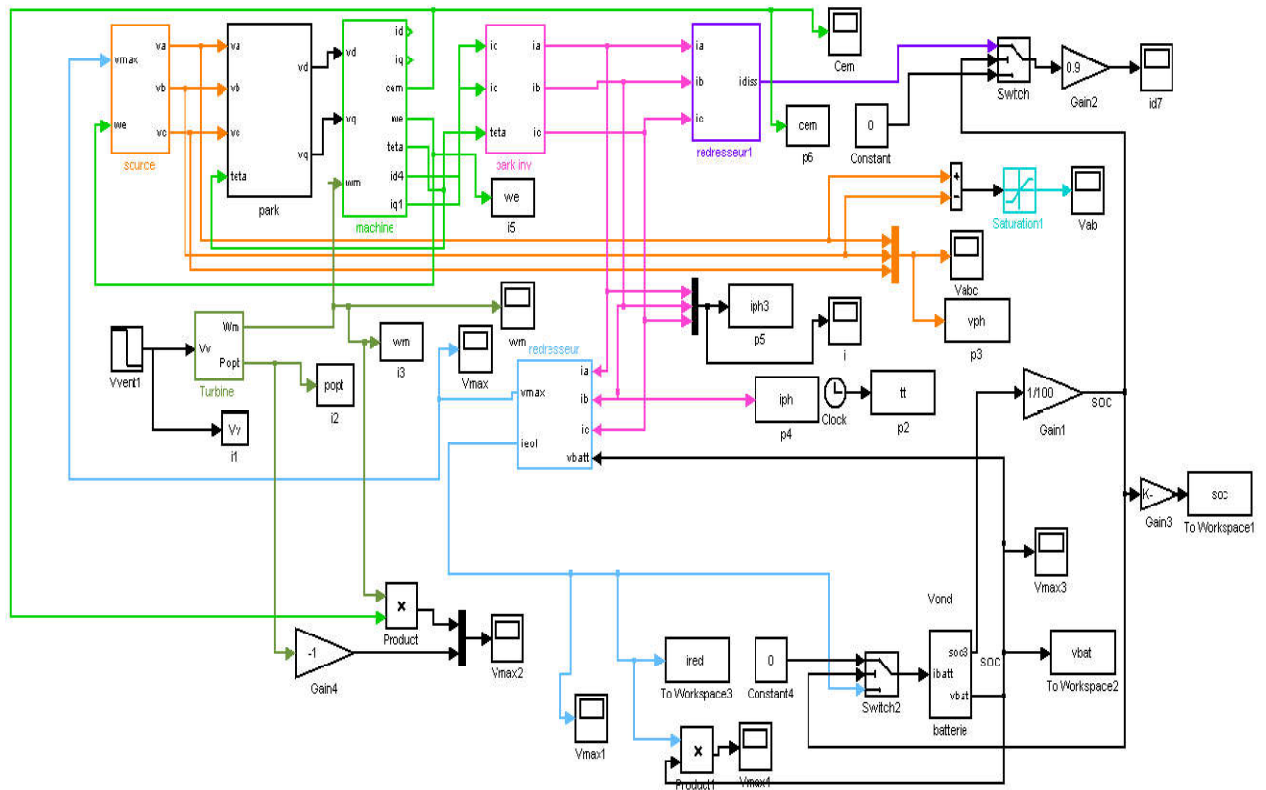


Figure III.5 : Schéma Bloc du système éolien.

### III.3.1. Résultats de la simulation

La figure (III.6) présente la variation de la vitesse du vent en fonction du temps

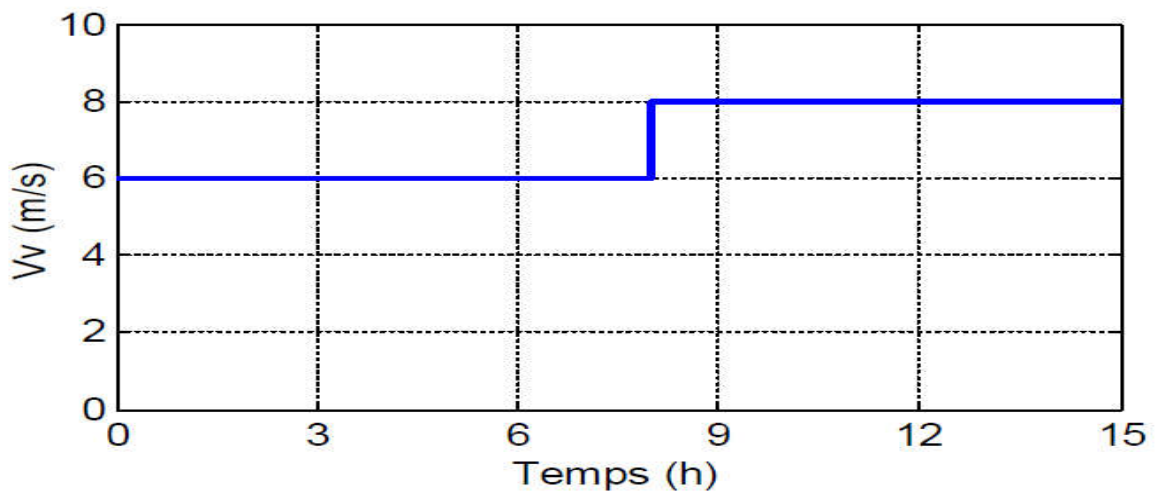
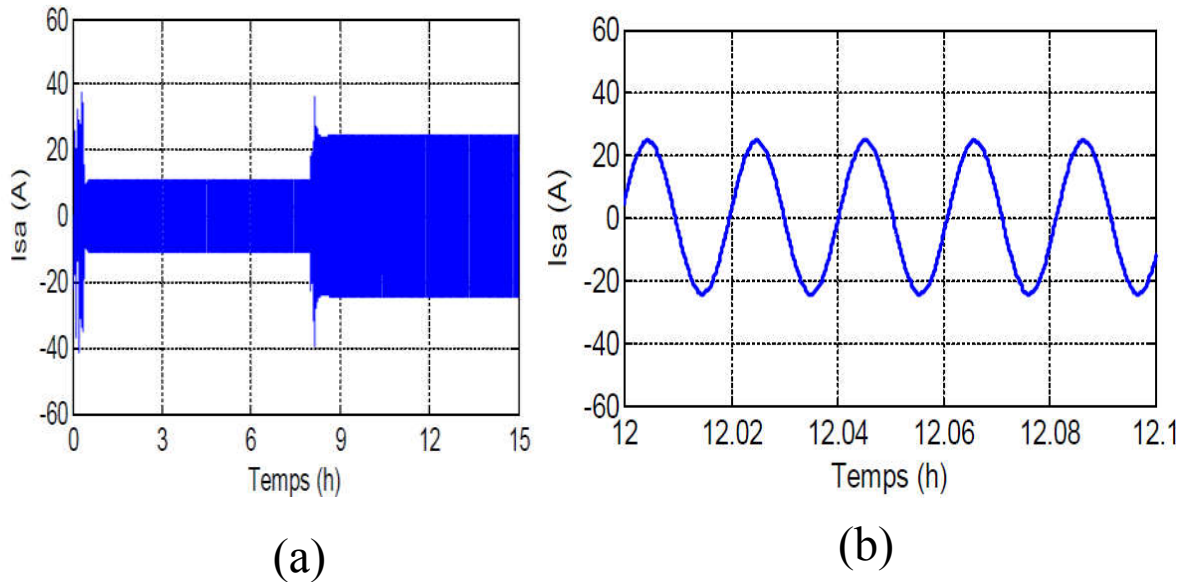


Figure III.6 : Profil du vent admissible par la turbine [m/s].

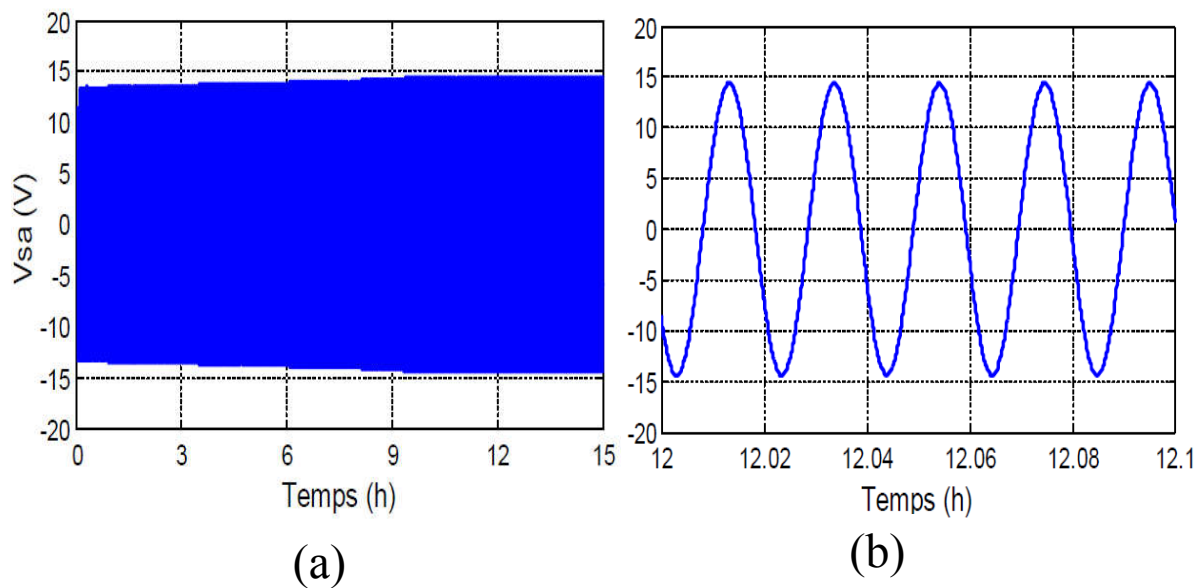
La Figure (III.7) présente l'évolution du courant à la sortie de l'éolienne en fonction du temps.



**Figure III.7:** le courant statorique à la sortie de l'éolienne (a) avant le zoom [A] et (b) après le zoom [A].

#### Interprétation des résultats :

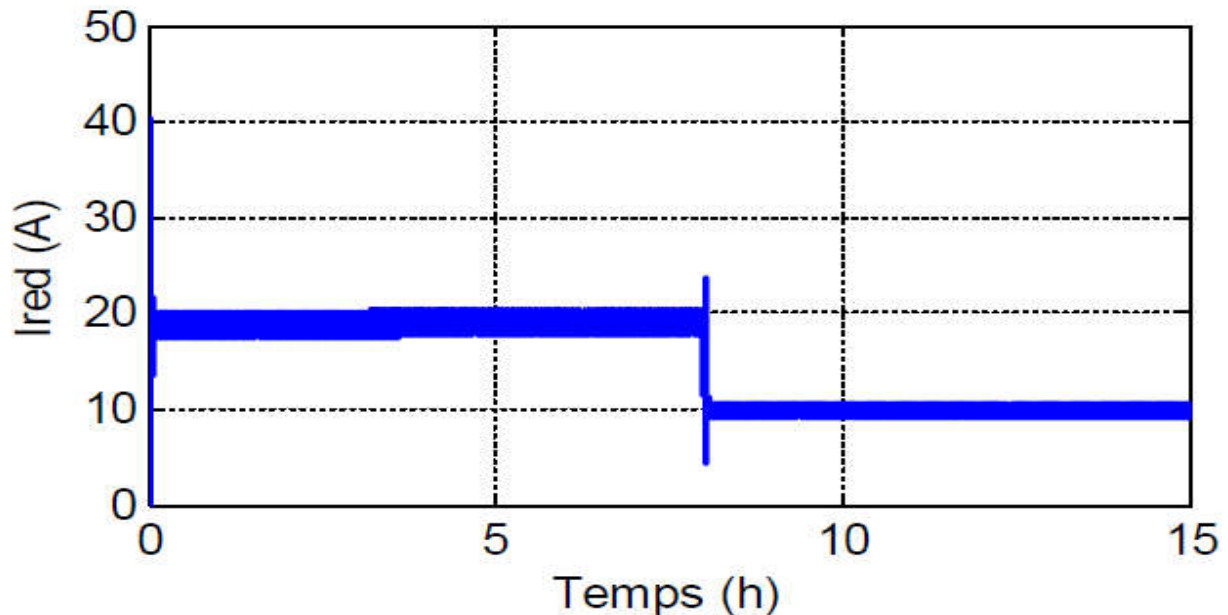
Les figures (III.7(a)) et (III.7 (b) ), on remarque qu'on a une variation importante tout au long du temps de mesure et elle suit la variation de la vitesse du vent.



**Figure III.8:** la tension statorique à la sortie de l'éolienne (a) avant le zoom [V] et (b) après le zoom [V].

**Interprétation des résultats :**

Les figures (III.8(a)) et (III.8 (b) ), montre l'évolution de la tension statorique à la sortie de la machine en fonction du temps. On a aussi remarque que la tension reste constante au fil du temps.



**Figure III.9:** la courbe du courant redressé [A].

**Interprétation du résultat :**

On remarque a partir de la figure (III.9) l'évolution du courant redressé à la sortie du redresseur en fonction du temps. On remarque que le courant se stabilise à la valeur ( $I_r = 20A$ ), ensuite diminue pour atteindre ( $I_r = 10A$ ).

**III.4. le système hybride étudié**

Dans cette section on a notre système hybride est composé de deux systèmes d'énergies renouvelables, une éolienne de 1KW associée à une génératrice d'une machine synchrone (MAS) à aimants permanents débitant sur un redresseur à diodes PD3, et l'autre c'est un système photovoltaïque de 6 panneaux branchés en parallèle de 175W et un convertisseur DC/DC à pilotage MPPT (Hacheur BOOST). Ces deux systèmes sont reliés à un contrôleur de charge puis à des batteries de 24V. Le système alimente une charge (groupe motopompe) alternative de 700W.

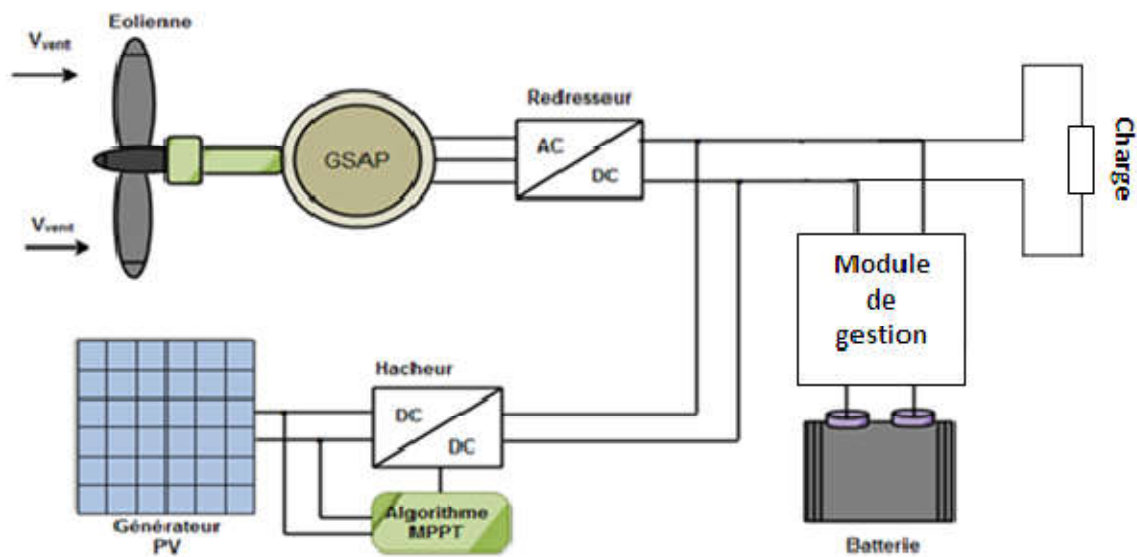


Figure III.10: Système hybride étudié.

#### III.4.1. Le model du système hybride global éolien photovoltaïque avec stockage sous Matlab/Simulink.

La figure (III.11) représente le schéma bloc sous Matlab/Simulink du système global (éolien-photovoltaïque) avec stockage.

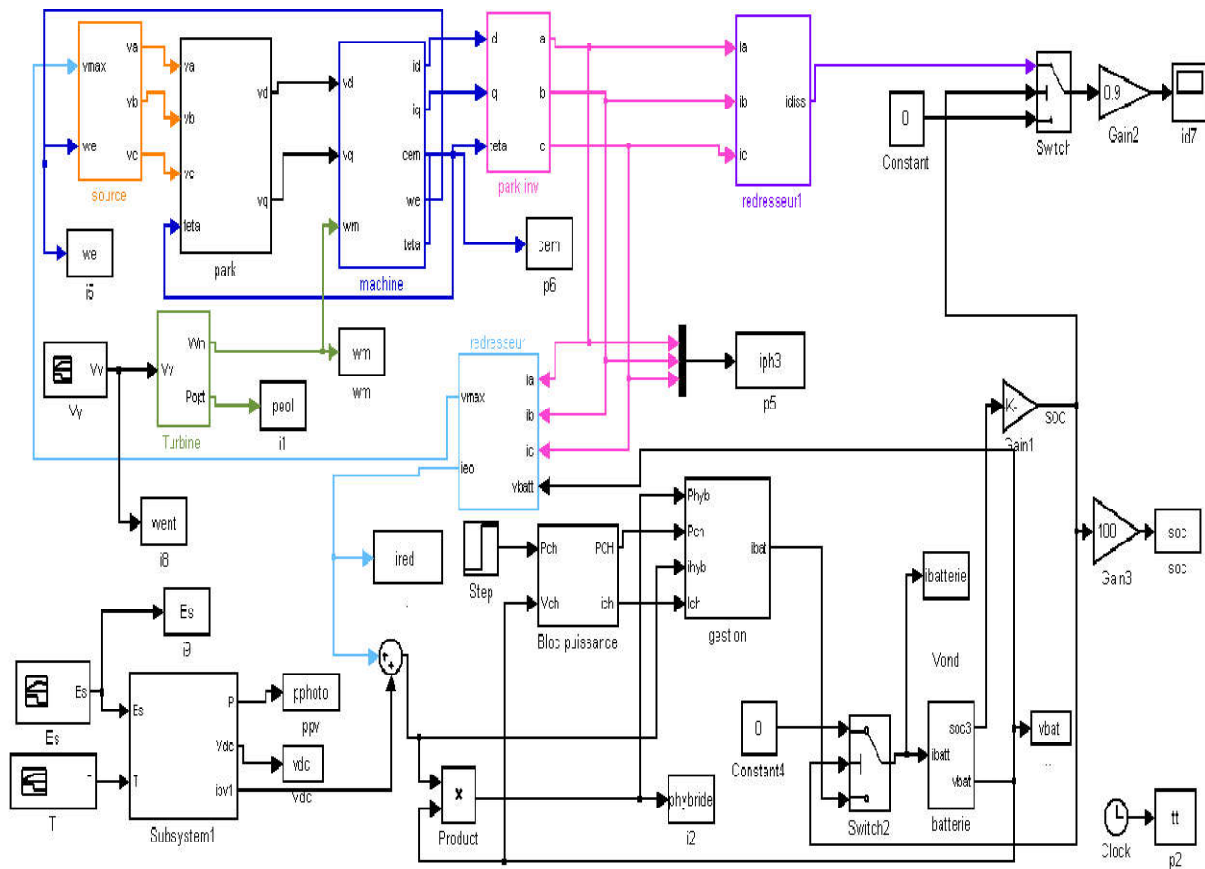


Figure III.11: Schéma Bloc du système hybride.

### III.4.2. Résultat de la simulation

La figure (III.12) représente le résultat de simulation de Profil du vent en fonction du temps.

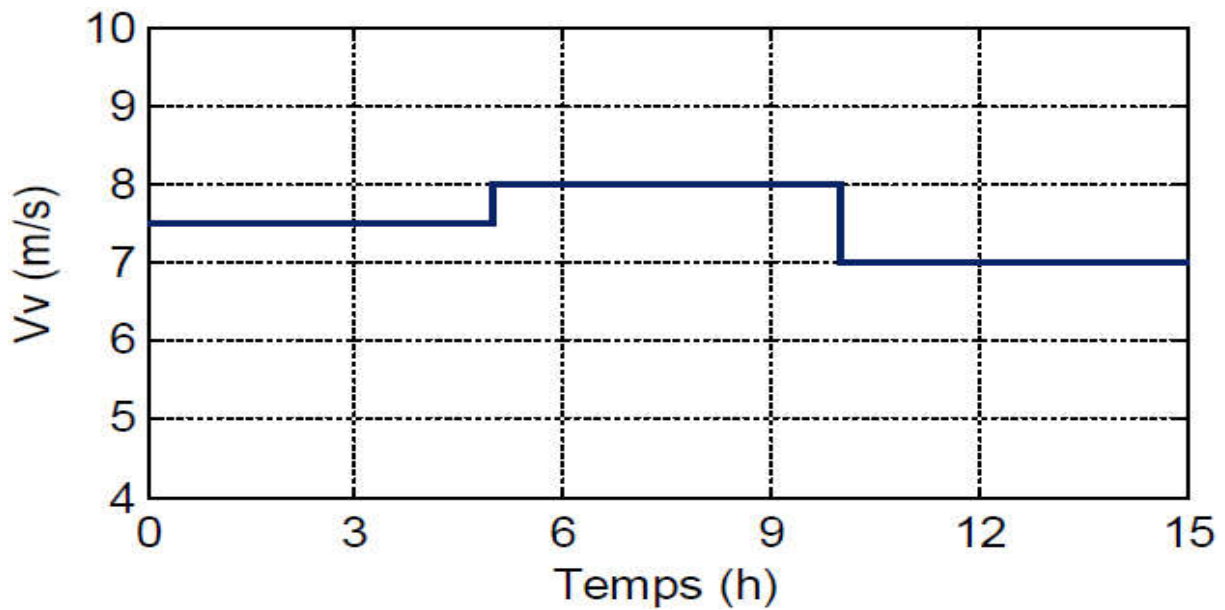


Figure III.12: Profil du vent.

#### Interprétation du résultat :

On remarque à partir de la figure (III.12) que le profil du vent appliqué au système hybride est varié entre  $V_v = 7$  m/s et  $V_v = 8$  m/s durant le temps.

La figure (III.13) représente le résultat de simulation de l'allure de la puissance de la turbine éolienne en fonction de temps.

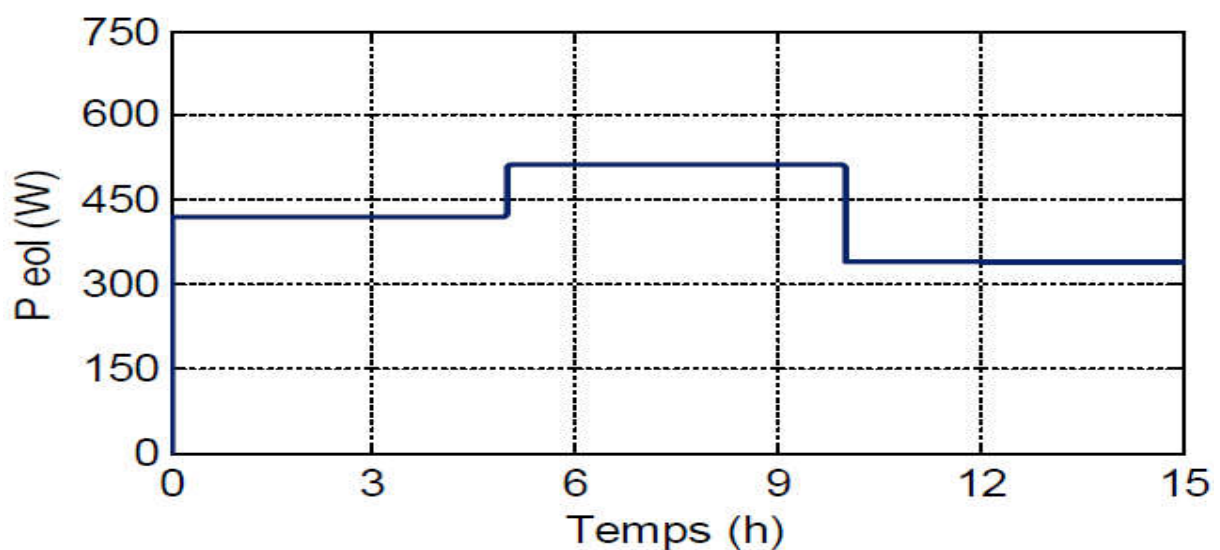


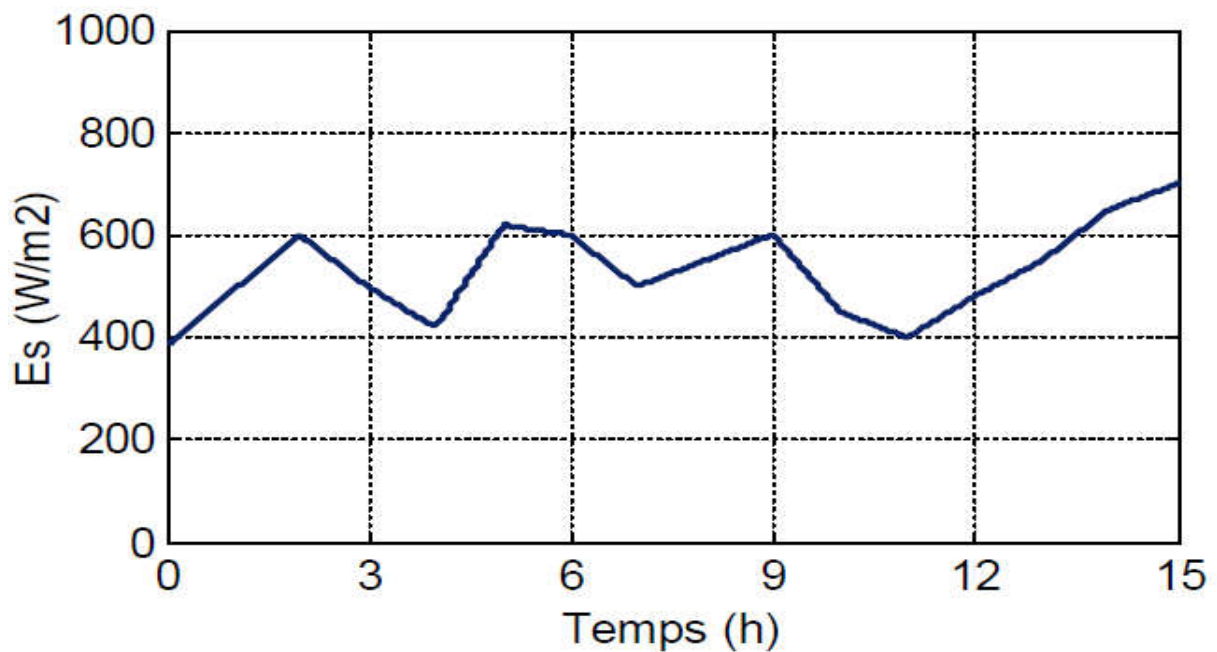
Figure III.13: L'allure de puissance de la turbine éolienne.



**Interprétation du résultat :**

On remarque à partir de la figure (III.13) l'illustration de l'évolution de la puissance éolienne en fonction du temps est variée proportionnellement à la vitesse du vent.

La figure (III.14) représente le résultat de simulation de la variation temporelle de l'ensoleillement ( $W/m^2$ ) en fonction de temps.

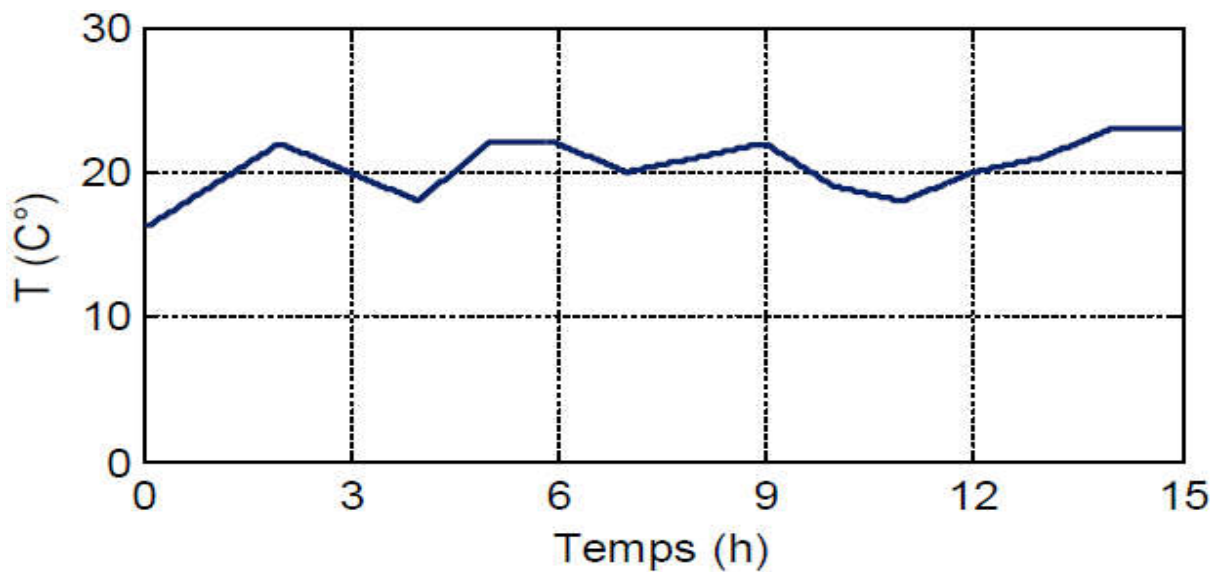


**Figure III.14:** Variation temporelle de l'ensoleillement ( $W/m^2$ ).

**Interprétation du résultat :**

On remarque à partir de la figure (III.14) l'illustration de la variation de l'ensoleillement en fonction du temps il y'a harmonique des énergies.

La figure (III.15) représente le résultat de simulation de l'allure de la température [ $^{\circ}\text{C}$ ] en fonction de temps.

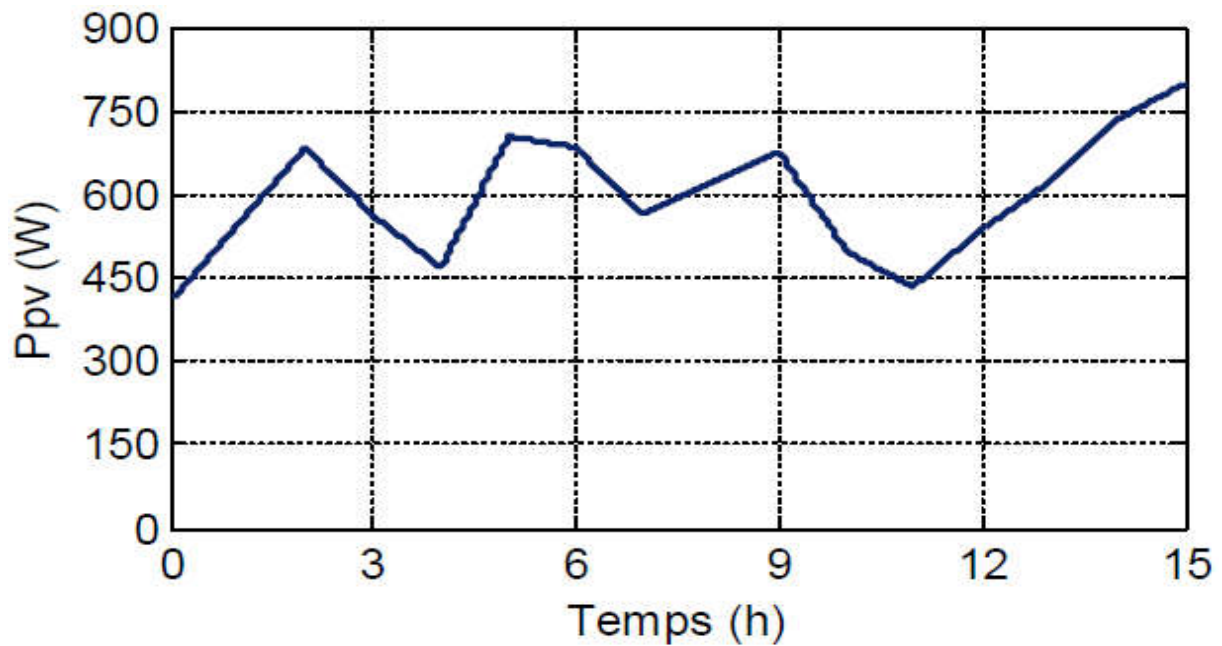


**Figure III.15:** L'allure de la température [ $^{\circ}\text{C}$ ].

#### Interprétation du résultat :

On remarque à partir de la figure (III.15) la variation de la température réelle en fonction du temps. La température varie entre deux valeurs ( $T = 17^{\circ}\text{C}$  et  $T = 22^{\circ}\text{C}$ ).

La figure (III.16) représente le résultat de simulation de Puissance photovoltaïque du système en fonction de temps.



**Figure III.16:** Puissance photovoltaïque du système.

#### Interprétation du résultat :

À partir de la figure (III.16), l'illustration de l'évolution de la puissance photovoltaïque en fonction du temps est variée entre deux valeurs limites qui sont ( $E_s=400W$  et  $700W$ ). La courbe de la puissance photovoltaïque est l'image de la variation de l'ensoleillement.

La figure (III.17) représente le résultat de simulation de puissance hybride en fonction de temps.

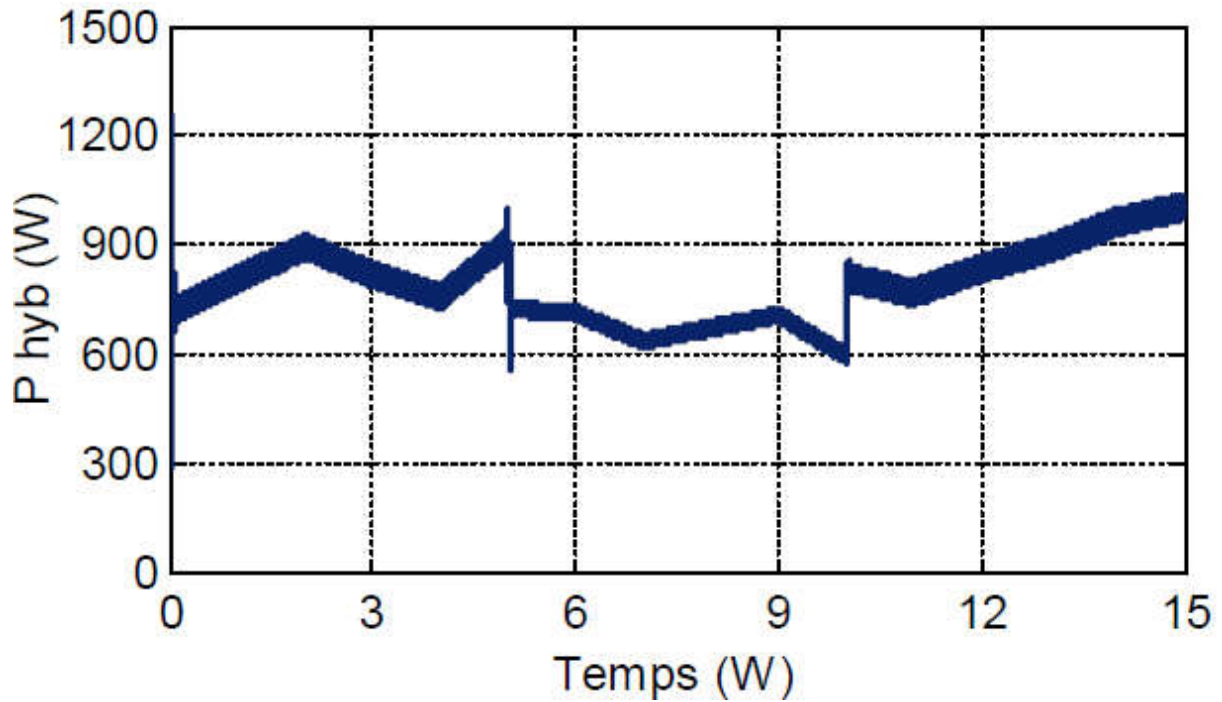
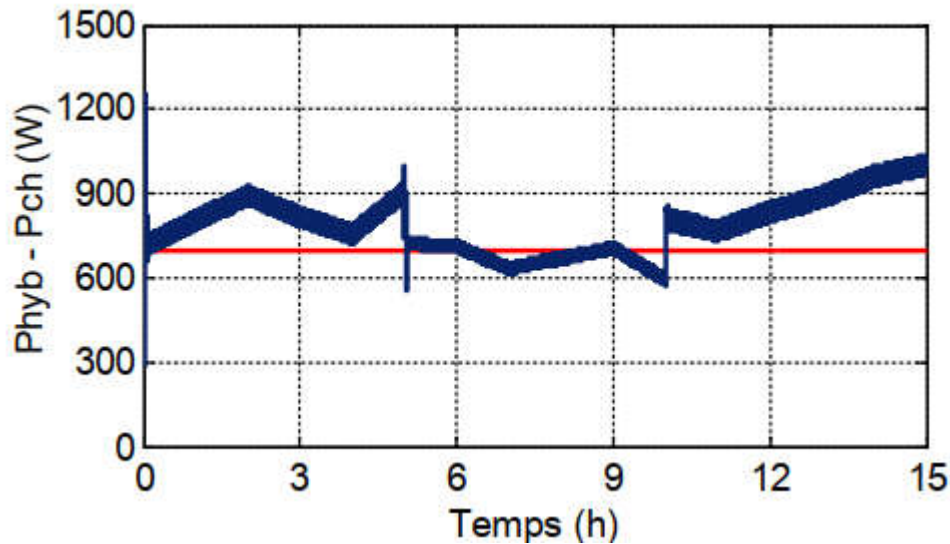


Figure III.17: puissance hybride.

#### Interprétation du résultat :

On constate à partir de la figure (III.17) que la variation temporelle de puissance hybride en fonction du temps est la somme des deux puissances éolienne et photovoltaïque.

La figure (III.18) représente le résultat de simulation de la puissance hybride et la puissance de charge en fonction de temps.



**Figure (III.18):** L'allure de la puissance hybride et de la puissance de charge.

#### Interprétation du résultat :

La figure (III.18) 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 elle est égale à 700W, tandis que la puissance hybride fournie par le système varie tout au long du temps de simulation.

#### III.5. conclusion :

Dans ce chapitre nous avons fait la simulation du deux système (éolien et photovoltaïque) avec batterie de stockage suivis par la simulation du système globale. Ces résultats de simulation ont révélé un bon comportement face aux variations climatiques.

# *Conclusion générale*

## *Conclusion générale*

Le travail qu'on a présenté dans ce mémoire est a un objectif de étudié, modélisé et simulé une chaine hybride de production d'énergie électrique avec système de stockage a partir des sources renouvelables (photovoltaïque-éolienne).

Nous avons étudiés le premier partie nous avons présentés l'état de l'art sur les systèmes hybride composé par une chaine photovoltaïque et une chaine éolienne.

Le deuxième point est consacré à la présentation des deux sources d'énergie renouvelables existantes, notamment les énergies photovoltaïque et éolienne. Puis on a présenté quelque combinaison des systèmes hybrides.

Le troisième point est dédié à la modélisation de chaque composant de chaque chaine de conversion du système hybride. En suite nous avons détaillé une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque composée par des panneaux de type Sharp, Une chaine de conversion d'énergie éolienne se compose d'une turbine éolienne fonctionnant avec une génératrice synchrone à aimants permanents, débitant sur un redresseur à diodes et des batteries de stockage.

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

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent et le bon fonctionnement du système globale.

Ce travail nous a permis :

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

Comme perspectives, Nous concluons que les résultats obtenus sont très satisfaisants en termes de choix du nouveau système de énergie renouvelable basé sur le photovoltaïque et éolien. Ils ont de différents points forts et sont tous aussi importants. Ils sont basés sur une

combinaison unique de technique couplées de la photovoltaïque et de la éolien ont été utilisée dans le system proposé. Toutes ces caractéristiques rendent le système robuste et réalisable pour fourni la puissance avec faible consommation d'énergies du système renouvelable. Par ailleurs a partir de deux simulation des systèmes présentes et des résultats d'analyse, il est claire que l'utilisation des méthodes mathématique soit de la puissance et d'énergie des mesures sont complémentaires pour opter sur le meilleur système à utilisées pour notre nouveau système de énergie renouvelable .les résultats obtenus ont montrés que l'utilisation du deuxième système est plus approprie.



*Référence bibliographique*

## Référence bibliographique

---

- [1] L. Bernal-Agustin and R. Dufo-Lapez, "Simulation and optimisation of standalone hybrid renewable energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, pp. 2111 - 2118, 2009. doi: 10.1016/j.rser.2009.01.010
- [2] P. Bajpai and V. Dash, "Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2926-2939, 2012. doi: 10.1016/j.rser.2012.02.009
- [3] M. A. Sendhil, S. Balasubramanian, and G. Arunkumar, "Current Status of Research on Hybrid Power Generation Systems," *Res. 1. Appl. Sei. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 14, pp. 1684-1690, 2014.
- [4] C. Gopal, M. Mohanraj, P. Chandramohan, and P. Chandrasekar, "Renewable energy source water pumping systems - A literature review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 351-370, 2013.
- [5] [www.neal-dz.net](http://www.neal-dz.net) : New Energy Algeria, 2009
- [6] <http://www.in-terre-actif.com/> consulté en avril 2012
- [7] S. Petibon, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, Janvier, 2009.
- [8] Clément Tranain « Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques » Rapport de stage de fin de D.U.T. Mesures Physiques Université Paris VII 2, place Jussieu 75005 Paris Mai 2006
- [9] Z. Bendjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », mémoire de Magistère, UNIVERSITE DE BECHAR. 2009
- [11] M. Nikoz, H. Dehbonei, C. Naher ( A DSP- Controlled photovoltaic system with MPPT) *Revue electric all energy and information technology ITEE*, Australia 2003. pp: 1-6.
- [12] A. HAMIDAT, B. BENYOUCEF and T. HARTANI, « Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions ». *Renewable Energy*, Vol. 28, pp. 1081-1096, 2003.
- [13] L. LAZARI, N. MEBARKI, « Etude d'un système photovoltaïque », Mémoire Master2, de l'université de Béjaïa, 2014
- [14] En ligne : <http://www.wikipedia.org>.
- [15] 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.

## Référence bibliographique

---

- [16] M. SADAoui Elias, MEDDOURI Mustapha «Gestion d'énergie dans un système hybride (Photovoltaïque - Eolien)» Master en électrotechnique option : Commande des systèmes électrique. Université de Bejaia, année 2012.
- [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] Tiar Mourad, « commande optimale d'un système de génération photovoltaïque hybride», soutenue le 10-10-2011.
- [19] 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.
- [20] A. KAABECHE, M. BELHAMEL, R. IBTIOUEN, S. MOUSSA et M. R.BENHADDADI, « Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3 199 – 209, 2006.
- [21] Y. PANKOW, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque», Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de L'ENSAMED 432, Lille, 2004.
- [22] S. Elaimani « modélisation de différents technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » thèse de doctorat de l'école centrale de Lille, France, 2004.
- [23] 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.
- [24] S.LALOUNI, «Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolien) », Docteur en sciences de l'université de Bejaia,2009.
- [25] D. Rekioua, O. Amrani « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques ». Conférence sur les énergies renouvelables, l'université de Bejaia, Algérie 2007.
- [26] D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque-éolien – diesel », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°4 623 – 633, 2008.
- [27] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA». Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [28] C. Serir, « commande d'un système multi-sources photovoltaïque-éolien associée à un système de stockage ». Mémoire de doctorat, université de Bejaia, Algérie 2017.
- [29] L. ZAROUR « Etude technique d'un système d'énergie Hybride photovoltaïque-éolien hors réseau » Thèse de doctorat Electrotechnique option machines électriques, université de Constantine, 2010.

# Annexes

**Paramètres de la turbine :**

Paramètres	Valeurs
Puissance nominale	1000 W
Nombre de pales	3
Rayon de la turbine	2.2 m
Vitesse minimale de la turbine	3.3 m/s
Vitesse maximale de la turbine	12.6 m/s

## *Résumé*

Dans ces dernières années les performances l'énergie photovoltaïque offrent la produire de l'électricité par le système hybride photovoltaïque Eolien (PV-E). Un système hybride photovoltaïque Eolien combine deux systèmes solaires différents (Eolien et photovoltaïque). Ce phénomène générer en même temps de l'électricité par convertisseur statistique de l'énergie en courant électrique. Cette conversion se passe par le biais d'un onduleur permet de relier les installations hybride solaire au réseau charge de la batterie.

**Mots-clés :** système hybride (PV-E) , photovoltaïque, Eolien, conversion statistique. Onduleur, batterie

## **الملخص :**

في السنوات الأخيرة ، عرض أداء الطاقة الكهروضوئية إنتاج الكهرباء بواسطة النظام الهجين الكهروضوئي الرياح (PV-E). يجمع النظام الكهروضوئي للرياح الهجين بين نظامين مختلفين من الطاقة الشمسية (الرياح والضوئية). (هذه الظاهرة تولد الكهرباء في نفس الوقت عن طريق التحويل الإحصائي للطاقة إلى تيار كهربائي يحدث هذا التحويل عبر العاكس ، والذي يسمح بتوصيل المنشآت الشمسية الهجينة بشبكة شحن البطارية.

**الكلمات المفتاحية :** النظام الهجين (PV-E) ، الفولطاضوئية ، الرياح ، التحويل الإحصائي. العاكس ، البطارية